



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH LINEÁRNÍHO OSCILAČNÍHO POHONU S VNĚJŠÍM BUZENÍM

DESIGN OF LINEAR EXTERNAL EXCITATION DRIVE WITH OSCILLATIVE MOTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN GÄRTNER

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADISLAV SINGULE, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Gärtner

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh lineárního oscilačního pohonu s vnějším buzením

v anglickém jazyce:

Design of linear external excitation drive with oscillative motion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Lineární pohony s konstantním oscilačním pohybem jsou uplatnitelné v řadě technických i medicínských aplikací. Funkční a prostorovou integrací mechanických a elektrických komponent lze dosáhnout podstatného zjednodušení konstrukce, redukce rozměrů a zvýšení spolehlivosti a životnosti výrobku. Stanoveným výstupem úkolu je návrh lineárního oscilačního pohonu s amplitudou kmitavého pohybu cca 50 mm a frekvencí 1 až 2 Hz.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracujte analýzu používaných lineárních pohonů.
2. Navrhněte koncepci lineárního pohonu s oscilačním pohybem, který která splňuje zadané vstupní parametry.
3. Simulačním modelováním navrhněte parametry lineárního pohonu.
4. Simulačně ověřte dynamické chování a řízení navrženého pohonu.
5. Vytvořte výkresovou dokumentaci pro výrobu funkčního vzorku.

Seznam odborné literatury:

- Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha, 1994.
Fiala, P., Kadlecová, E.: Modelování elektromagnetických polí, VUT v Brně, Brno, 2005.
Měřička, J., Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje, SNTL, Praha, 1973.
Koláčný, J.: Elektrické pohony, VUT v Brně, Brno.
Roubíček, O.: Elektrické motory a pohony, BEN, 2004
Skalický, J.: Teorie řízení 1, VUT v Brně, Brno, 2002.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem lineárního oscilačního pohonu s vnějším buzením. V první části je uveden popis typů lineárních motorů. Dále je součástí také analýza konkrétních lineárních pohonů z patentové databáze. V další části práce je vlastní návrh koncepce lineárního oscilačního pohonu. Návrh obsahuje geometrický model vytvořený v software Solidworks, výpočet sil v software Ansys a dynamické modely mechanické a elektrické části pohonu v software Matlab/Simulink. Jsou zmíněny též možnosti řízení tohoto pohonu.

ABSTRACT

This thesis deals with design of linear external excitation drive with oscillative motion. In the first part of the work is shown describe types of linear motors. Further is a part of analysis of concrete linear drives from patents database. In the next part of this work is straight design of linear external excitation drive with oscillative motion. The conception include geometric model created with software Solidworks, calculation of forces with software Ansys and dynamic models of mechanical and electrical part of drive with software Matlab/Simulink. And is a mentions possibility of controls of this drive too.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Lineární pohon, impulsní čerpadlo, Solidworks, Ansys, Matlab/Simulink,

KEY WORDS:

Linear drive, impulse pump, Solidworks, Ansys, Matlab/Simulink

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690

GÄRTNER, J. *Návrh lineárního oscilačního pohonu s vnějším buzením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 90 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „*Návrh lineárního oscilačního pohonu s vnějším buzením*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších citovaných zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci této práce.

Jan Gärtner, Brno, 2010

.....

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladislavovi Singulemu, CSc, za poskytnutí rad a přimomínek. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a také za trpělivost.

Poděkování patří také mé rodině, za maximální podporu během celého studia.

OBSAH

1. ÚVOD	11
2. LINEÁRNÍ POHON	12
2.1. Princip lineárního pohonu	13
2.2. Typy lineárních motorů	14
2.2.1. Synchronní lineární motor	14
2.2.2. Asynchronní lineární motor	16
2.2.3. Krokový lineární motor	17
2.2.4. Tubulární lineární motor	18
2.3. Varianty lineárních pohonů.....	19
2.3.1. Jednostranný lineární motor s magnety a rotačním kompenzátorem	19
2.3.2. Synchronní lineární motor bez permanentních magnetů	20
2.3.3. Lineární motor s Hallbachovým uspořádáním magnetů.....	21
2.3.4. Oboustranný plochý lineární motor bez feromagnetika	22
2.3.5. Synchronní lineární motor s vnitřními magnety	23
2.3.6. Plochý synchronní lineární motor.....	24
2.4. Lineární pohony z patentové databáze.....	25
2.4.1. Lineární magnetický motor/generátor	25
2.4.2. Lineární generátor elektrické energie 1	26
2.4.3. Lineární čerpadlo	27
2.4.4. Lineární oscilační motor	28
2.4.5. Lineární oscilační elektrický stroj buzený permanentním magnetem	30
2.4.6. Lineární oscilační pohon pro malé aplikace	32
2.4.7. Lineární motor	33
2.4.8. Lineární kompresor poháněný lineárním motorem	36
2.4.9. Lineární elektrický generátor.....	37
2.4.10. Lineární generátor.....	38
2.4.11. Lineární generátor elektrické energie 2	39
2.4.12. Čerpadlo s lineárním pohonem.....	41
2.4.13. Lineární motor s permanentními magnety.....	43

3.	ZHODNOCENÍ PATENTŮ.....	45
4.	NÁVRH KONSTRUKCE LINEÁRNÍHO POHONU.....	47
4.1.	Návrh konstrukce 1	47
4.2.	Návrh konstrukce 2	47
4.3.	Návrh konstrukce 3	49
4.4.	Parametry pohonu.....	50
5.	SIMULAČNÍ MODEL LINEÁRNÍHO POHONU.....	51
5.1.	Geometrický model.....	51
5.2.	MKP model lineárního pohonu	52
5.3.	Výsledky simulačního MKP modelování.....	56
5.3.1.	Tabulka výsledků.....	58
6.	SILOVÉ POMĚRY POHONU	62
6.1.	Dynamická simulace lineárního pohonu	66
6.1.1.	Mechanický model.....	66
6.1.2.	Elektrický model.....	70
6.1.3.	Komplexní mechatronický model pohonu.....	76
6.2.	Energetická bilance	81
7.	MOŽNOSTI ŘÍZENÍ LINEÁRNÍHO POHONU	83
8.	ZÁVĚR	85
9.	POUŽITÁ LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE	87
10.	PŘÍLOHY.....	90

1. ÚVOD

Lineární pohony umožňují přímou přeměnu elektrické energie na translační pohyb. To znamená, že dokáží transformovat elektrickou energii na mechanickou energii translačního pohybu bez mechanických převodů. Díky tomu je jejich konstrukce jednodušší a mohou tak být spolehlivější. I když jejich principy jsou známy dlouhou dobu, prakticky stejně dlouho, jako u klasických rotačních strojů, jejich většímu rozvoji a praktickému nasazení do praxe došlo teprve nedávno. Příčinou je zejména fakt, že lineární motor je finančně nákladnější než běžný rotační motor, navíc u lineárních motorů existuje určité omezení v podobě velkých přitažlivých sil, které jsou způsobeny použitím silných permanentních magnetů. Výhodou těchto motorů je však skutečnost, že mnohem lépe obstojí v dynamicky náročných aplikacích, kde jsou vyžadovány velké rychlosti a zrychlení, další výhodou je přesnější polohování a jednodušší přenos mechanické síly.

Účelem této práce je návrh konstrukce oscilačního lineárního pohonu, který by bylo možno využít v širokém spektru praktických aplikací. Práce je zaměřena na návrh jednoduchého a kompaktního pohonu, který bude možno implementovat do impulsního čerpadla.

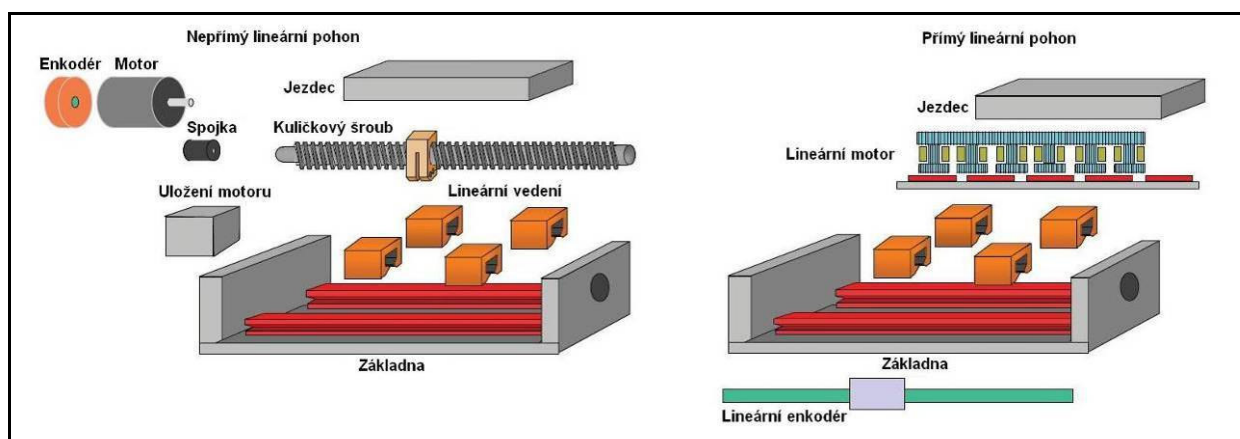
2. LINEÁRNÍ POHON

Lineární pohon je takový pohon, který nevykonává rotační, ale přímočarý pohyb a umožňuje přímou transformaci elektrické energie na mechanickou energii translačního pohybu postupného nebo kmitavého. Lineární pohony lze rozdělit do dvou kategorií, na lineární pohony přímé a nepřímé (viz Obr. 1).

Přímým lineárním pohonem je lineární elektromotor, zjednodušeně řečeno klasický rotační motor rozvinutý do roviny, stator a rotor motoru jsou uloženy bezkontaktně, přičemž vždy buď stator, nebo rotor je uložen pevně a ke druhé pohyblivé součásti je připevněno poháněné zařízení.

Nepřímý lineární pohon je tvořen klasickým rotačním elektromotorem spojeným s kuličkovým šroubem. Poháněné zařízení je připevněno k matici navlečené na kuličkovém šroubu, přičemž při otáčení šroubu je prostřednictvím matice na poháněném zařízení vykonáván lineární pohyb.

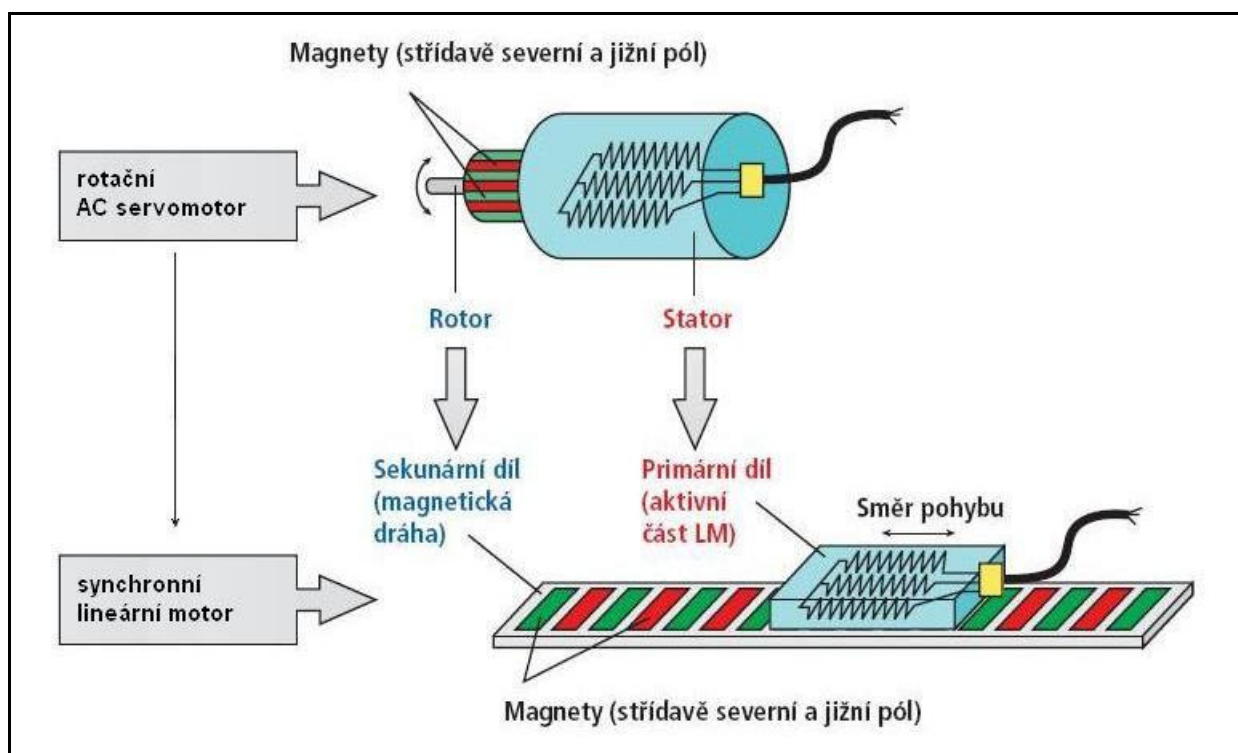
Možnosti klasických rotačních motorů s mechanickým převodem z pohybu rotačního na pohyb lineární (viz Obr. 1) jsou v řadě aplikací využívány na hranici dynamiky dané setrvačnými hmotami a na hranici přesnosti dané mechanickými vůlemi a opotřebením. Mezi další důvody rozvoje těchto pohonů lze zařadit především cenovou dostupnost jednotlivých komponent – výkonové elektroniky, čidel a permanentních magnetů na bázi vzácných zemin, zejména slitin neodymu železa a bóru (Nd-Fe-B). [1], [2]



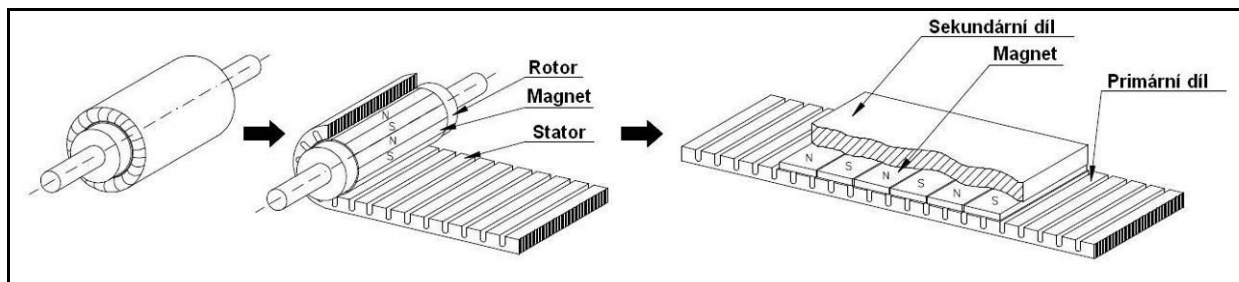
Obr. 1: Srovnání přímého a nepřímého lineárního pohonu [3]

2.1. Princip lineárního pohonu

Lineární motor pracuje na indukčním principu. Lze si jej představit jako klasický rotační motor rozvinutý do roviny (viz Obr. 3). V podstatě každý druh elektrického rotačního stroje má svůj lineární protějšek. Statorem je u lineárního motoru zpravidla označována primární část a rotorem sekundární část. Primární část je tvořena stejně jako u klasických rotačních strojů feromagnetickým svazkem složeným z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí uloženého v jeho drážkách. Proti primární části je konstrukčně uspořádána sekundární část. U synchronního motoru je sekundární část tvořena permanentními magnety ze vzácných zemin (např. Nd-Fe-B), které jsou nalepené na ocelové podložce (viz Obr. 3). U asynchronního motoru tvoří sekundární část klec nakrátko uložená buď do drážek feromagnetického svazku, nebo připevněná na ocelovou podložku poháněného zařízení (viz Obr. 2). Sekundární část je většinou delší částí stroje. Pokud je do primární části přiveden proud, vznikne mezi oběma částmi magnetické pole a dojde k pohybu jezdce.



Obr. 2: Lineární motor [2]



Obr. 3: Lineární motor [1]

Velikostí proudu lze ovládat rychlost pohybu. Pro řízení těchto pohonů se většinou používají číslíkové regulátory s kaskádovou regulační strukturou, kterou reprezentují tři regulační smyčky, vnitřní proudová, které je nadřazena rychlostní smyčka a hlavní, vnější smyčka polohová, někdy bývá do obvodu zařazena též smyčka regulace zrychlení. O tom, která část lineárního motoru se bude pohybovat, rozhoduje konstrukční uspořádání stroje.

V naprosté většině aplikací se pohybuje primární část (jezdec) po dráze tvořené libovolným počtem sekundárních dílů. Toto uspořádání ovšem vyžaduje pohyblivé připojení napájecího kabelu a kabelu snímačů polohy, v některých případech též přívod chladicí kapaliny, což lze chápat, jako jistou nevýhodu.

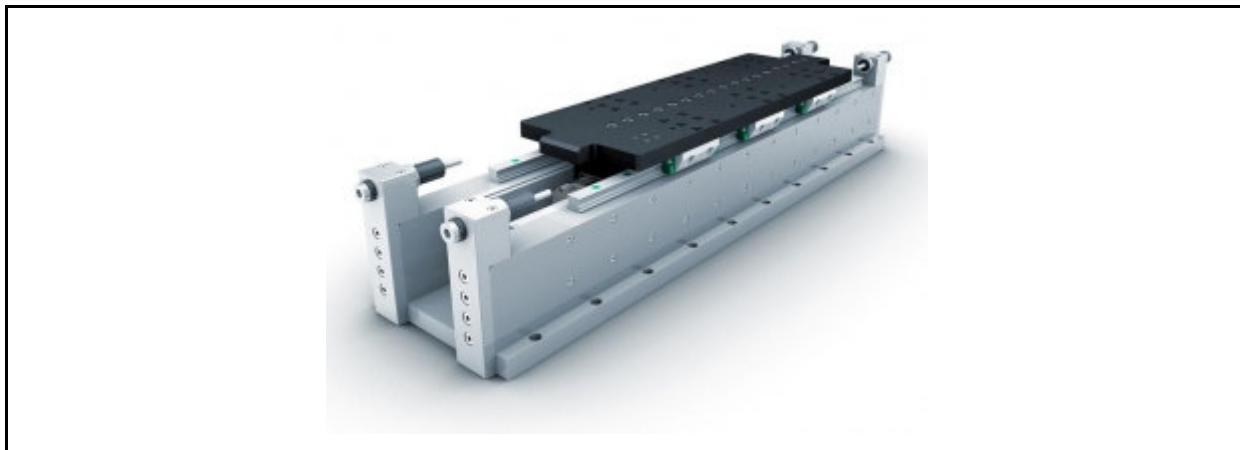
Podle konstrukce existuje několik možných variant lineárních motorů. Jsou to motory synchronní, asynchronní, krokové, stejnosměrné s komutátorem nebo reluktanční. [1], [2]

2.2. Typy lineárních motorů

2.2.1. Synchronní lineární motor

Synchronní lineární motor (viz Obr. 4) je buzen permanentními magnety, v dnešní době jsou to nejčastěji magnety ze slitiny Nd-Fe-B. Permanentní magnety jsou uloženy vedle sebe na sekundárním dílu. Vinutí je rozloženo na primární části. Proudové jednotlivých fází jsou u tohoto typu motoru využity jen k vývinu síly, to znamená, že využití vinutí je lepší. Ohmické ztráty vznikají u synchronního motoru jen v primárním dílu, proto jsou menší než v případě asynchronního motoru. U tohoto motoru je síla zvlněná jen při pohybu (cca 5%), protože v klidu protékají vinutím pouze stejnosměrné (případně mírně zvlněné) proudy. Přitažlivá síla mezi primární a sekundární částí je u synchronního motoru značně vyšší, než u

motoru asynchronního a zůstává prakticky stejná jak v zapnutém, tak i ve vypnutém stavu. [1], [4]



Obr. 4: Synchronní lineární motor [5]

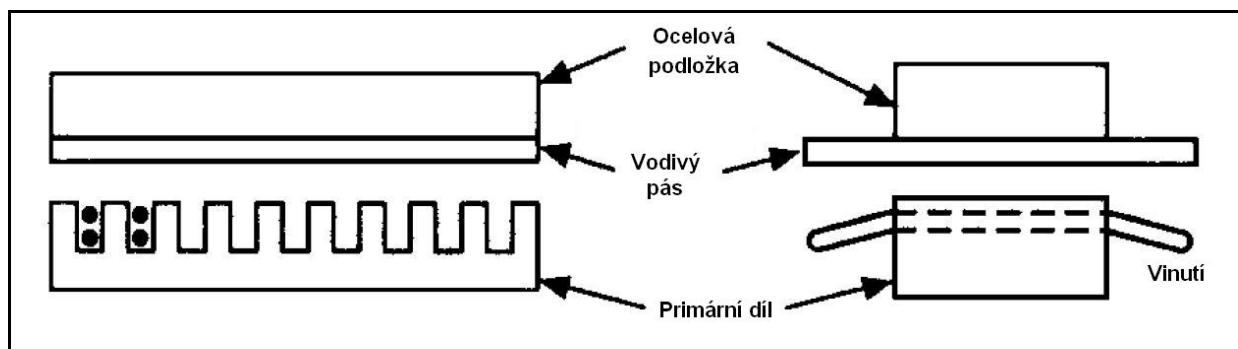
Běžně používané synchronní lineární motory mají primární (pohyblivý) magnetický obvod složený z železných plechů, jedná se o tzv. ironcore motory. Dalším vývojovým krokem v oblasti synchronních lineárních motorů jsou speciální bezželezné lineární motory, tzv. ironless lineární motory, které v primární části neobsahují žádné magneticky aktivní železo a jejichž cívky jsou uloženy v nemagnetickém nosiči (viz Obr. 5). Poskytují všechny výhody běžného přímého lineárního pohonu bez některých negativních vlastností. Jsou vhodné pro pohon zařízení s malou hmotností a vysokou dynamikou. Umožňují dosahovat velkých rychlostí a zrychlení a hodí se pro přesné polohování (bez překmitů). Mezi pohyblivou a nepohyblivou částí nevzniká žádná přitažlivá síla, která u motorů se železem několikanásobně převyšuje maximální posuvovou sílu. Vzhledem k velké účinnosti mají bezželezné lineární pohony nízké provozní náklady. Nevýhodou je horší odvod tepla a z toho plynoucí menší přípustné trvalé zatížení. [6]



Obr. 5: Bezželezný synchronní lineární motor [7]

2.2.2. Asynchronní lineární motor

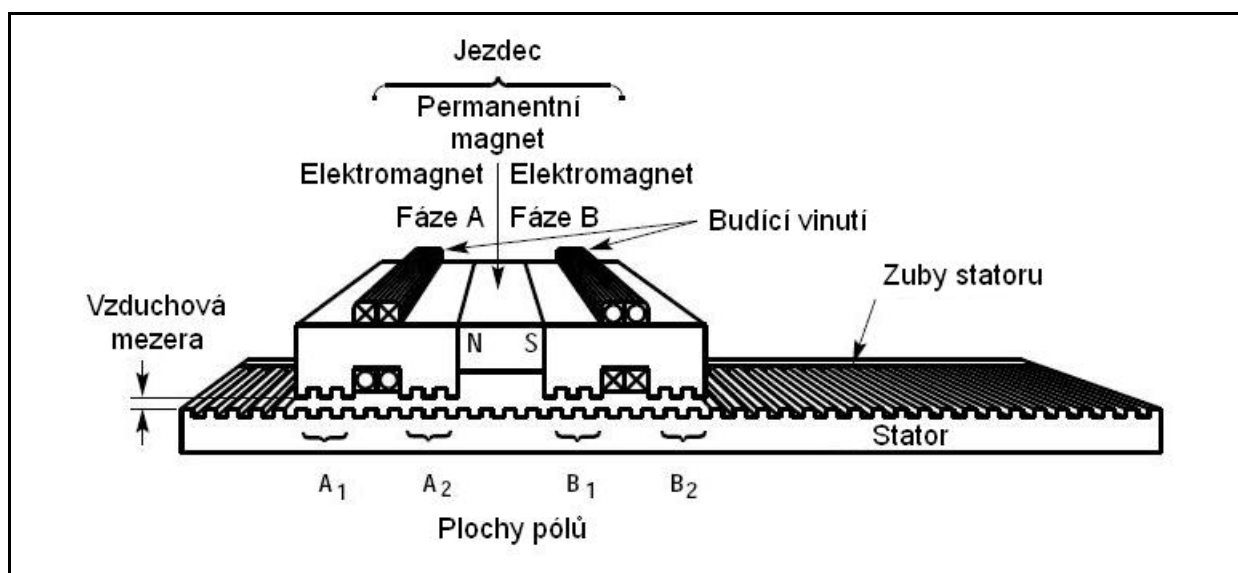
Primární díl asynchronního motoru (viz Obr. 6) je podobný jako u synchronního, obsahuje svazek železných lamel s drážkami, do kterých je uloženo střídavé třífázové vinutí zapojené nejčastěji do hvězdy. Sekundární díl je jednodušší než u motoru synchronního a je buď složen s dynamo plechů s drážkami, ve kterých jsou uloženy měděné tyče propojené nakrátko, nebo z hliníkového, případně měděného pásu připevněného na ocelovou podložku. Ke vzniku vlastního magnetického pole je do sekundární části indukován proud z primáru. K tomu je nutný skluz mezi rychlostí střídavého pole primáru a rychlostí posuvu. Jelikož asynchronní motor pracuje na indukčním principu, vznikají u něj Jouleovy ztráty způsobené magnetizačními proudy v primáru a proudy indukovanými v sekundáru. U tohoto typu motoru dochází ke zvlnění posunové síly účinkem pólů a drážek v každém provozním stavu, tedy i ve stavu klidovém. Zvlnění přitažlivé síly mezi primární a sekundární částí je u asynchronního motoru větší než u motoru synchronního (cca 7%). Asynchronní motor je oproti motoru synchronnímu ve vypnutém stavu magneticky pasivní. Velkou výhodou pohonů s asynchronními lineárními motory je možnost napájení z běžné rozvodné sítě 3 x 400 V / 50 Hz bez nutnosti použití kmitočtového měniče. [1], [4]



Obr. 6: Asynchronní lineární motor [8]

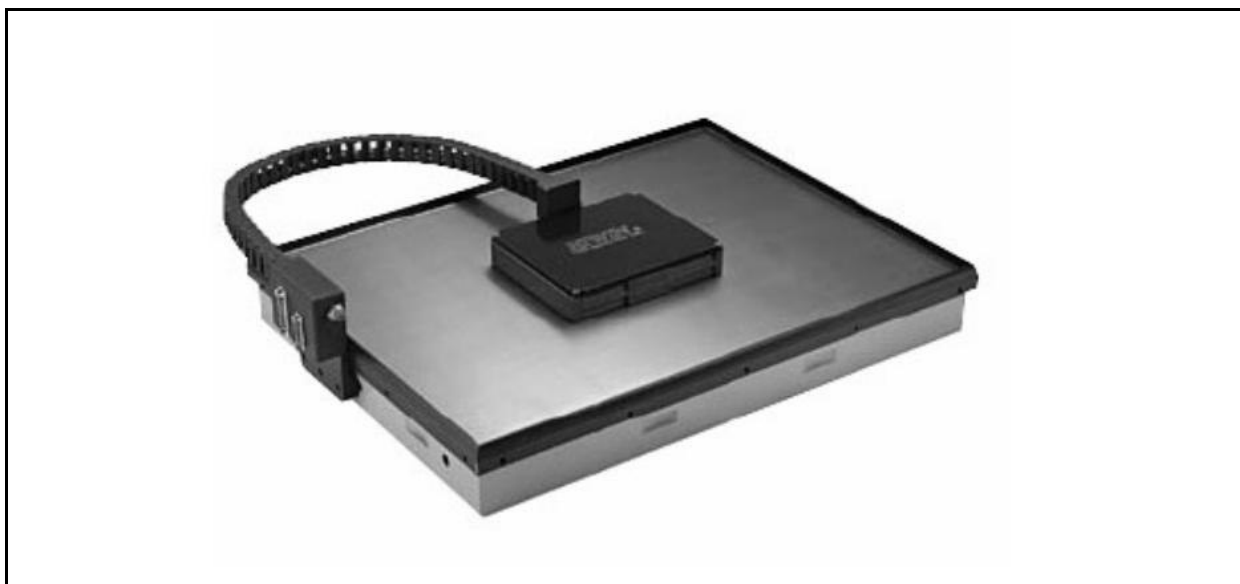
2.2.3. Krokový lineární motor

Krokové lineární motory jsou vhodné zejména pro číslicové řízení. Tyto motory využívají v podstatě stejný princip činnosti jako rotační krokové motory. Výhodou lineární verze krokového motoru oproti verzi rotační je jemnější krokování a nižší pracovní frekvence. Jsou určeny zejména pro pomalé, ale velmi přesné polohování. Motor (viz Obr. 7) je složen z pevného lineárního statoru, nad kterým se pohybuje na tenkém vzduchovém polštáři běžec. Při pohybu běžce nevznikají mechanické ztráty ani opotřebení. Na funkci motoru nemá vliv ani malé znečištění povrchu statoru. Mezi hlavní výhody těchto motorů patří značná účinnost a dlouhá životnost a navíc jsou prakticky bezúdržbové. [8]



Obr. 7: Dvoufázový krokový lineární motor [9]

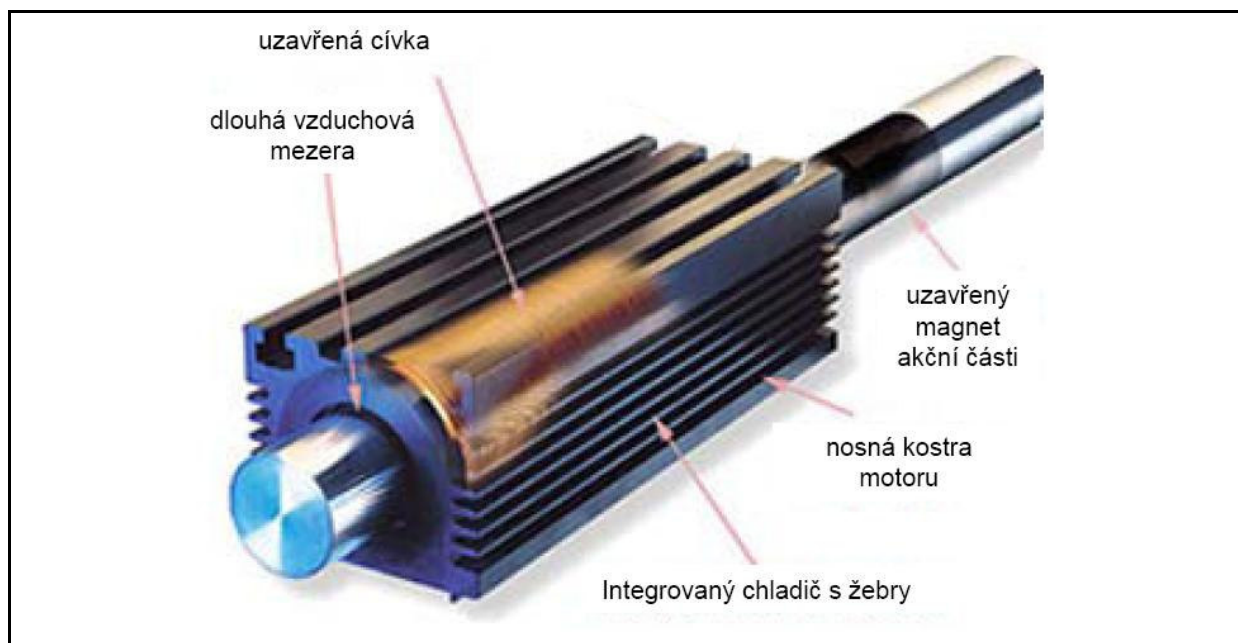
Další variantou lineárního krokového motoru je planární lineární motor (viz Obr. 8). Jde o dvoufázový planární krokový motor s integrovaným systémem odměřování aktuální polohy jezdce. Mezi jezdce a magnetickou dráhou nedochází k přímému styku, protože jezdce se pohybuje na vzduchovém polštáři. Tento typ motoru je určen pro menší zatížení, řádově v kg. Rozlišení motoru je 0,001 mm. Maximální rychlost jezdce je do 0,9 m/s. Tyto motory se hodí pro aplikace jako je vedení nástroje pro montáž jemných elektrotechnických součástek, pájení desek plošných spojů, nosiče kamerových systémů atd. [2]



Obr. 8: Planární lineární motor [2]

2.2.4. Tubulární lineární motor

Jde o silově vyváženou variantu, tzv. elektroválec (viz Obr. 9). Primární díl má tvar jako klasický rotační motor s chladicími žebry, často je chlazený vodou. Vinutí s aktivním železem obepíná pohybovou část - pístnici, ve které jsou umístěny permanentní magnety. Vzhledem k rotačně symetrickému uspořádání motoru jsou kompenzovány přitažlivé magnetické síly mezi primární a sekundární částí a díky tomu nejsou přenášeny na poháněné zařízení. Další výhodou je také lepší využití pole permanentních magnetů bez rozptylových toků a absence pulsací tažné síly. Konstrukce motoru navíc poskytuje lepší ochranu proti vniknutí nečistot. Pohony s motory této koncepce jsou určeny především pro přesné přísuvy vyvrtávacích automatů, obráběcí stroje, osazovací automaty, pohony ventilů, šoupátek atd. [1], [4], [9]

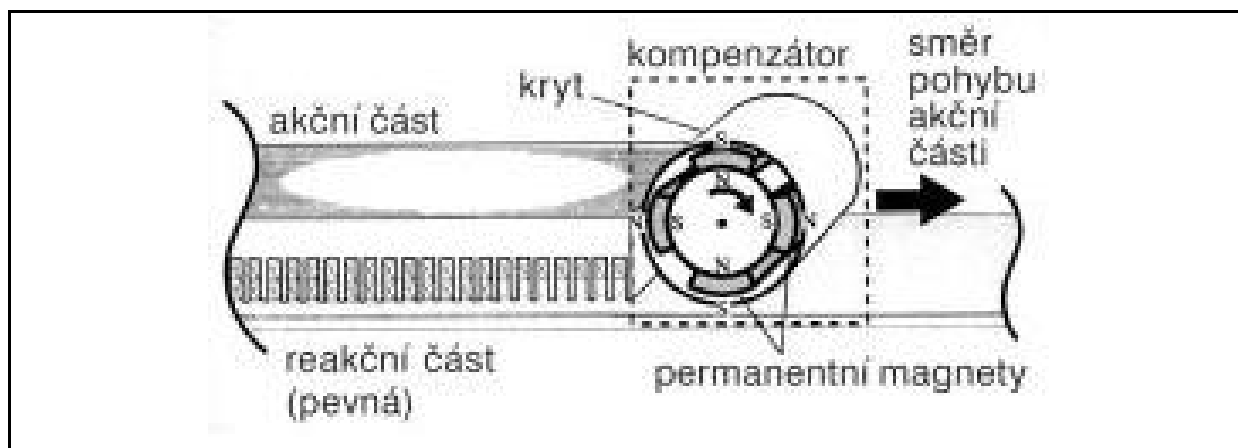


Obr. 9: Tubulární lineární motor [9]

2.3. Varianty lineárních pohonů

2.3.1. Jednostranný lineární motor s magnety a rotačním kompenzátorem

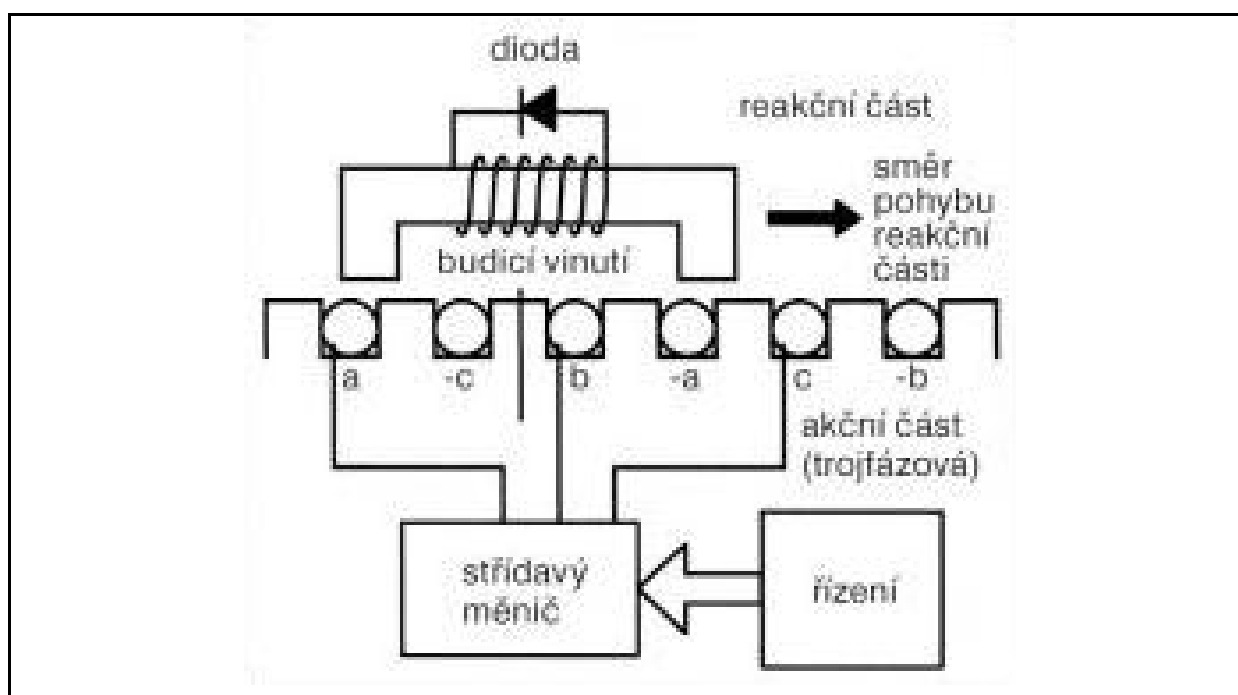
Základem činnosti plochého jednostranného indukčního lineárního motoru s permanentními magnety a rotačním kompenzátorem (viz Obr. 10) je, že vlivy podélného okrajového efektu lze kompenzovat reakcí přídavného pole vířivých proudů vytvořeného kompenzátorem s permanentními magnety v oblasti náběhové hrany akční části motoru. Rychlost otáčení f/p kompenzátoru s p pólovými dvojicemi je za pohybu konstantní a synchronizovaná s napájecí frekvencí f motoru. Kompenzační účinek roste s růstem rychlosti. Při praktických testech vykazoval motor se čtyřpólovým kompenzátorem cca 45% nárůst tažné síly a účinníku a vzrostla i účinnost, cca o 15%. [10]



Obr. 10: Indukční lineární motor s rotačním kompenzátorem [10]

2.3.2. Synchronní lineární motor bez permanentních magnetů

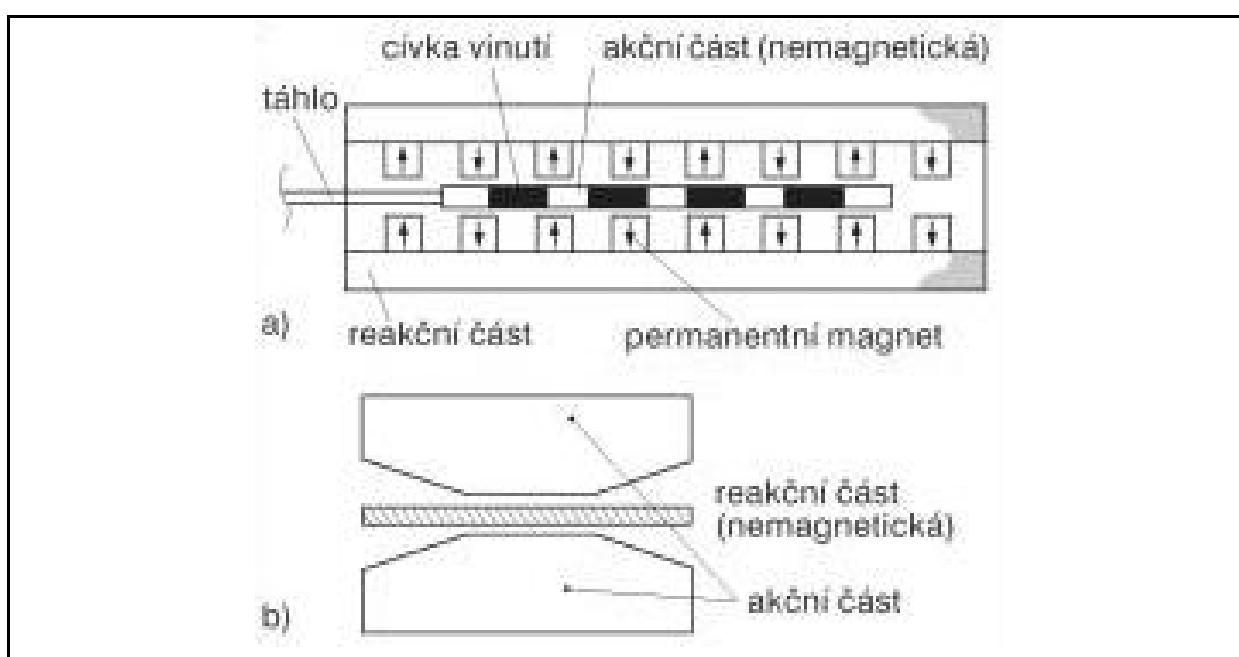
Na Obr. 11 lze vidět princip synchronního lineárního motoru bez permanentních magnetů buzeného jednopulzně usměrněným proudem indukovaným z trojfázové akční části do budicího vinutí pólů pohyblivé reakční části. Buzení je bezkartáčové a póly mohou mít optimální tvar, jenž omezuje nežádoucí účinky nerovnoměrností ve vzduchové mezeře motoru, podobně jako v případě 2.3.1. [10]



Obr. 11: Synchronní lineární motor s vlastním bezkartáčovým buzením [10]

2.3.4. Oboustranný plochý lineární motor bez feromagnetika

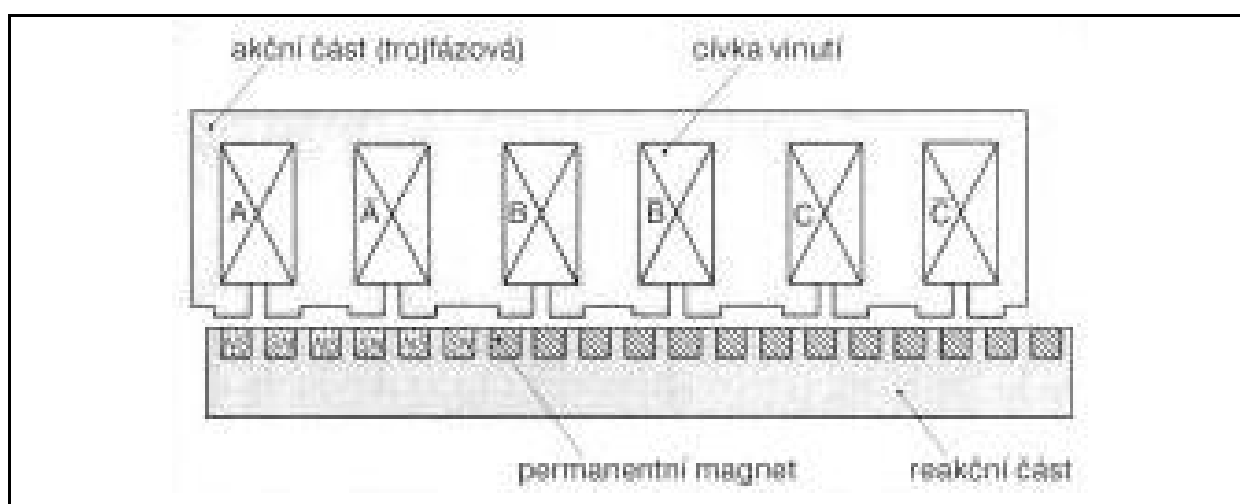
Oboustranné ploché lineární motory s krátkou pohyblivou akční nebo reakční částí bez feromagnetika (viz Obr. 14) vykazují velmi malé přitažlivé síly mezi akční a reakční částí. Synchronní lineární motor této koncepce s pohyblivou akční částí vykazuje mírné kolísání tažné síly, dobrou linearitu mezi proudem a tažnou silou a dále velmi malou elektrickou i mechanickou setrvačnost. Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem je tento motor vhodný pro použití v dynamicky náročných aplikacích nebo pro aplikace, které vyžadují přesné polohování. [10]



Obr. 14: Oboustranný plochý lineární motor [10]

2.3.5. Synchronní lineární motor s vnitřními magnety

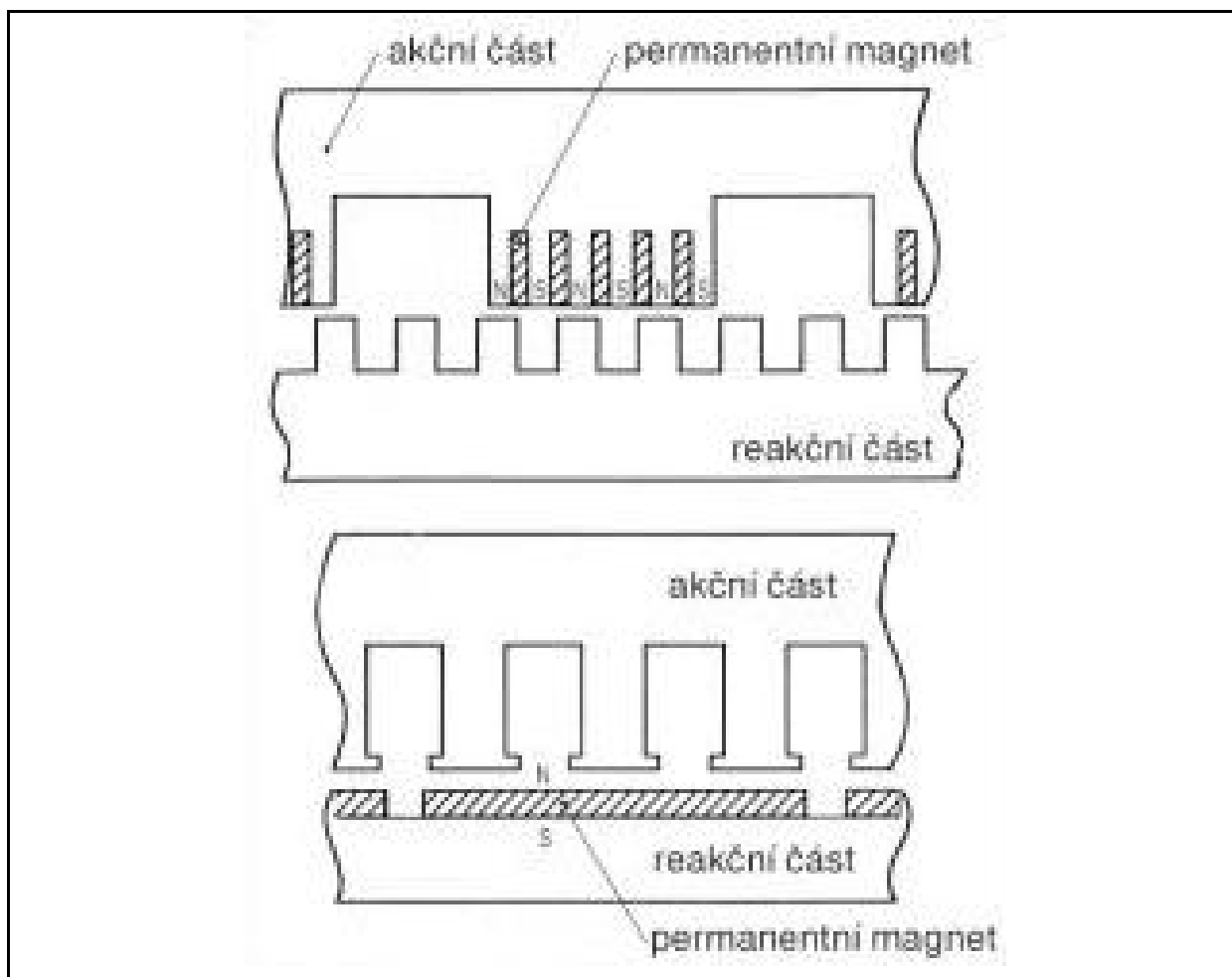
Motor této koncepce vykazuje velkou měrnou tažnou sílu díky optimalizaci rozměrů zubů akční a reakční části (viz Obr. 15), navíc permanentní magnety reakční části jsou magnetizovány ve směru pohybu. Při porovnání s běžnými typy menších synchronních motorů může být tažná síla na jednotku objemu motoru větší až o 100% a na jednotku povrchu vzduchové mezery a příkonu až o 80%. [10]



Obr. 15: Synchronní lineární motor s vnitřními magnety [10]

2.3.6. Plochý synchronní lineární motor

Velmi dobré tahové vlastnosti, ovšem podstatně menší oteplení vinutí při generování tažné síly, vykazuje též plochý synchronní lineární motor (viz Obr. 16). Ve srovnání s běžnými motory dosahuje až 2,7krát větší tažné síly na jednotku příkonu, přičemž při zatěžovací zkoušce bylo dosaženo o 60° C nižší oteplení vinutí oproti běžným motorům. [10]



Obr. 16: Plochý synchronní lineární motor [10]

2.4. Lineární pohony z patentové databáze

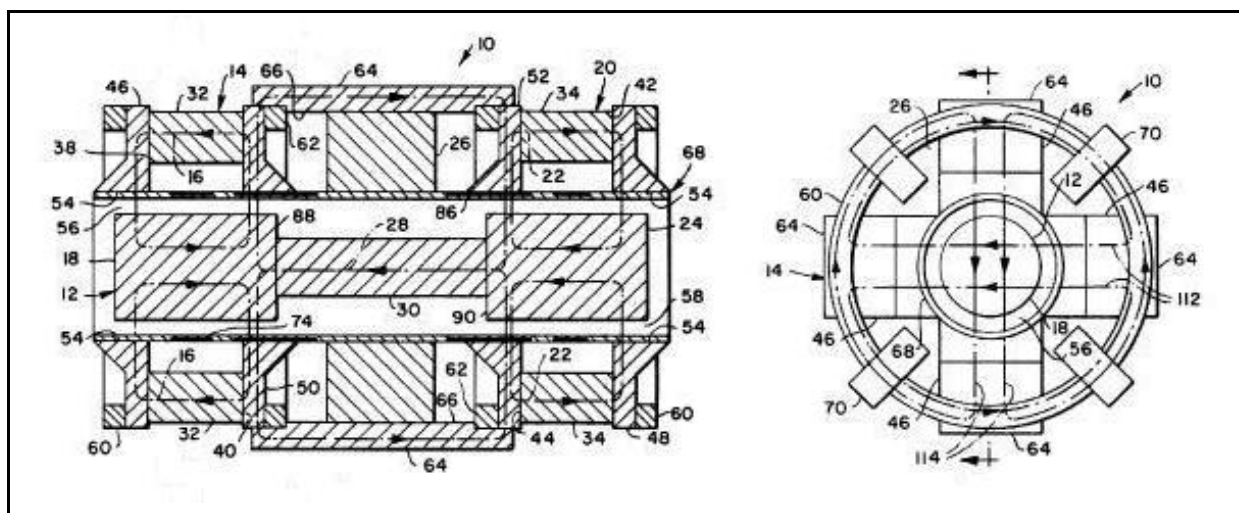
2.4.1. Lineární magnetický motor/generátor

US Patent 4315197 (1982)

Hlavním předmětem tohoto patentu je lineární magnetický motor/generátor. Cílem je zdokonalení konstrukce lineárního motoru/generátoru, návrh jednoduchého a ekonomicky přijatelného pohonu a vytvoření účinného a efektivního pohonu, který bude schopen pracovat v extrémních podmínkách.

Lineární magnetický motor/generátor 10 (viz Obr. 17) je složen z podélně pohyblivého válcového aktuátoru 12 a permanentních magnetů 14 a 20, které vymezují cestu prvního a druhého magnetického toku 16 a 22, procházejícího skrze první a druhý konec aktuátoru 18 a 24. Směry magnetického pole permanentních magnetů 14 a 20 jsou orientovány proti sobě. V případě magnetu 14 směřuje jeho severní pól k povrchu 38 a severní pól magnetu 20 směřuje k povrchu 42. Vinutí cívky 26 určuje cestu třetího magnetického toku 28 skrze centrální část aktuátoru 30, tento tok určuje výslednou axiální sílu na aktuátor. Jelikož prochází magnetický tok skrze části aktuátoru s rozdílnými průměry, uplatňuje se vliv vířivých proudů, které mají nepříznivý vliv na funkci aktuátoru. Pro omezení vlivu vířivých proudů je každá část 18, 24 a 30 tvořena z několika vrstev ocelového plechu.

V mnoha průmyslových aplikacích je použití lineárních motorů/generátorů výhodnější než použití běžných rotačních motorů/generátorů. Jednou z takových aplikací mohou být kompresory v kryogenních chladničkách, kde extrémně nízké teploty kryogenních procesů značně omezují životnost běžně používaných lineárně pohyblivých součástí. Zejména pokud jsou kryogenní zařízení umístěna ve vzdálených a nedostupných oblastech, například ve vesmíru, je hlavním požadavkem neomezená životnost zařízení s minimálním opotřebením mechanických součástí. [11]



Obr. 17: Lineární magnetický motor/generátor [11]

2.4.2. Lineární generátor elektrické energie 1

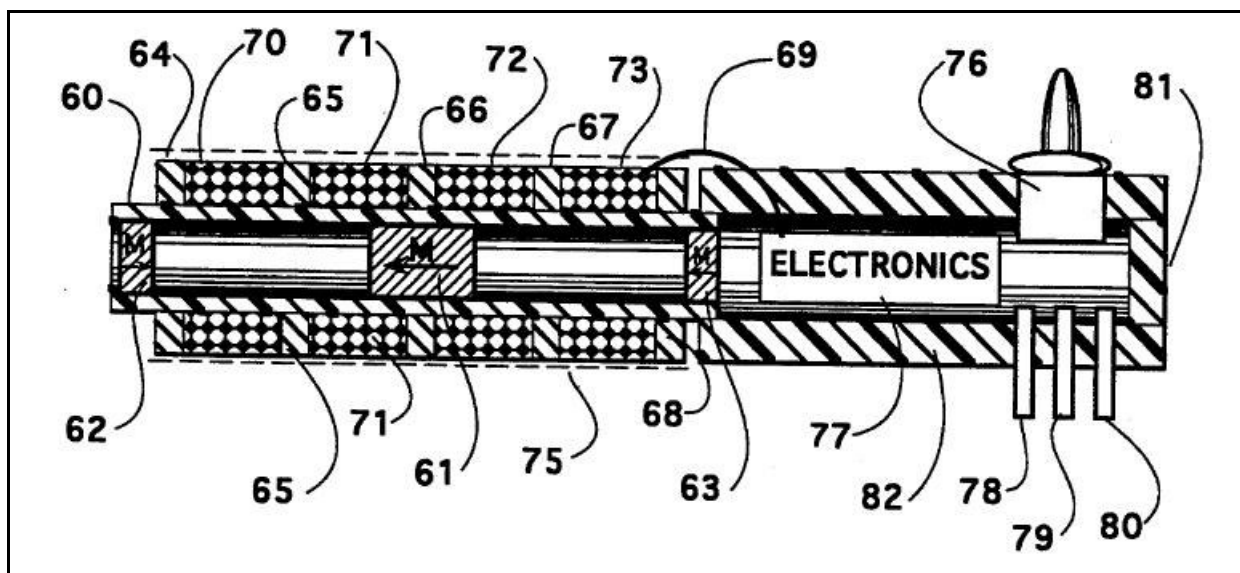
US Patent 5347186 (1994)

Tento patent se zabývá návrhem lineárního generátoru elektrické energie, který vytváří elektrickou energii přeměnou mechanické energie pohybujícího se magnetu.

Základem je magnet na bázi vzácných zemin, např. Ne-Fe-B, a cívka. Magnet se pohybuje uvnitř cívky, tím dochází k indukci napětí v cívkce. Magnet se pohybuje ve válcovém prostoru mezi dvěma dalšími magnety, které fungují jako magnetická pružina a zajišťují jeho neutrální polohu v klidovém stavu. Popisované zařízení tvoří plastová trubice 60 (viz Obr. 18) uzavřená z obou stran přilepenými permanentními magnety 62 a 63 a vnitřní pohyblivý permanentní magnet 61. Na trubici je nasunuto vinutí tvořené cívkami 70, 71, 72 a 73. Mezi cívkami jsou vloženy plastové distanční kroužky 64, 65, 66, 67 a 68. Vnitřní pohyblivý permanentní magnet 61 je na povrchu opatřen teflonovou vrstvou. Všechny použité permanentní magnety jsou z materiálu Ne-Fe-B. Okolo celé jednotky generátoru je navinuto stínění 75, sloužící k ochraně proti vlivu vnějších magnetických polí a ke zvýšení účinnosti generátoru. Vinutí je přes vedení 69 spojeno s elektronickou jednotkou 77.

Tento generátor umožňuje napájení elektrických zařízení, která jsou vzdálená od dostupných elektrických sítí, a jejichž připojení k běžné elektrické síti by bylo obtížné či nemožné. Jedná se například o získávání elektrické energie z vozovky přeměnou mechanické energie projíždějících automobilů, pomocí pružného potrubí umístěného napříč vozovkou, kdy při průjezdu automobilu přes potrubí je vytvořena tlaková vlna, která vychýlí pohyblivý magnet a tím dojde k indukci napětí ve vinutí. Další oblastí využití je získávání elektrické

energie při pohybu lidského těla nebo získávání elektrické energie z mechanické energie při pohybu mořských vln pro napájení různých monitorovacích a komunikačních zařízení. Toto elektrické zařízení lze použít také pro dobíjení baterií, případně jejich nahrazení. [13]



Obr. 18: Lineární generátor [13]

2.4.3. Lineární čerpadlo

US Patent 5924975 (1999)

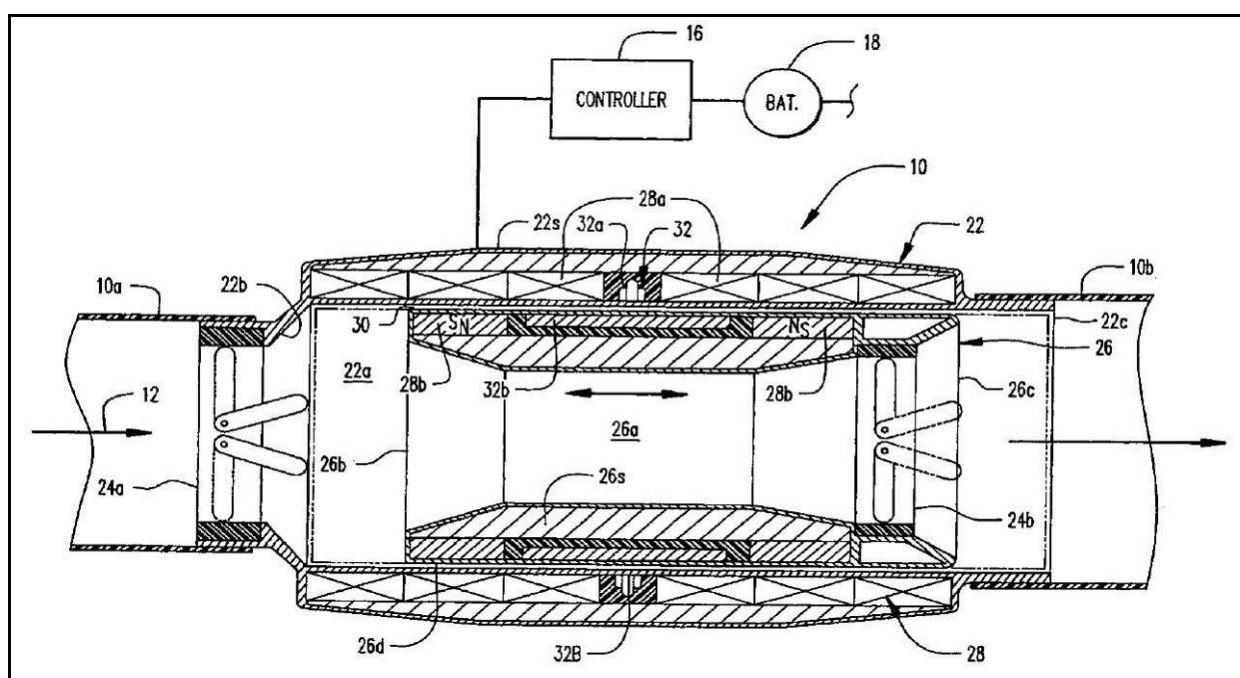
Uvedený patent se zabývá návrhem lineárního čerpadla pro čerpání tekutin, zejména pro čerpání krve v lidském těle, předpokládá se jeho využití při konstrukci umělého srdce.

Hlavní součástí lineárního čerpadla 10 (viz Obr. 19) je válcový blok 22 s válcovou dutinou 22a, s osově uloženým vtokovým 24a a výtokovým ventilem 24b. Vtokový ventil je součástí bloku čerpadla a je nepohyblivě připevněn na straně vtoku do válce 22b. Do válcové dutiny bloku čerpadla je vložen pohyblivý píst 26 tak, aby se mohl pohybovat v podélném směru. K pístu je na straně výtoku 26c připojen druhý ventil 24b, sloužící k řízení výtoku tekutiny z válce.

K pohonu čerpadla slouží lineární motor 28, který je složen z několika osově uložených statorových pohonných vinutí 28a, umístěných v bloku čerpadla 22. Statorová vinutí působí na dvojici prstencových permanentních magnetů 28b, integrovaných v pístu čerpadla 26. Prstencové magnety jsou umístěny odděleně na obou koncích pístu, přičemž jejich magnetická pole jsou nasměrována proti sobě. Působením statorového vinutí kmitá píst tam a zpět, a tak čerpá tekutinu postupně dovnitř a ven v jednom směru toku. Motor je napájen z baterií

18 implantovaných v těle pacienta dobíjených vnější indukční cívkou přes indukční cívku umístěnou pod kůží pacienta. Řízení pohonu na základě informací z polohového snímače 32 zajišťuje regulátor 16.

Vzhledem k tomu, že je toto čerpadlo určeno pro implantaci do lidského těla, musí být celé hermeticky zapouzdřeno v krytu z tzv. biokompatibilního materiálu, který je přijatelný pro lidský organizmus. [14]



Obr. 19: Lineární čerpadlo [14]

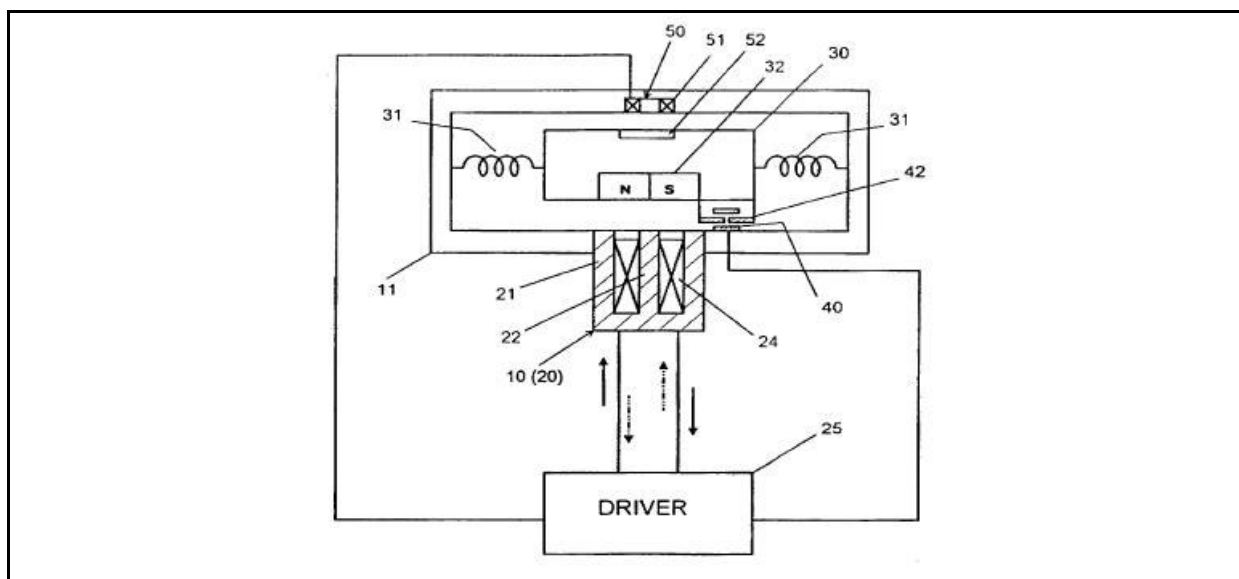
2.4.4. Lineární oscilační motor

US Patent 5736797 (1998)

Tento patent pojednává o lineárním oscilačním motoru se zpětnovazební kontrolou udržující konstantní amplitudu oscilací při proměnném zatěžování.

Lineární oscilační motor (viz Obr. 20) je složen z pohyblivého oscilátoru 30 s permanentním magnetem 32 a statoru 10 s elektromagnetem 20. Mezi permanentním magnetem oscilátoru a elektromagnetem je malá konstantní vzduchová mezera. Když je do elektromagnetu přiveden elektrický proud, působí na oscilátor silou, následně se oscilátor začne pohybovat vůči statoru v lineárním směru. Pružiny 31 působí na oscilátor vratnou silou. Zpětnou vazbu v soustavě zajišťuje foto senzor 40 a indukční senzor 50. Při každém průchodu oscilátoru rovnovážnou polohou je výstupem z foto senzoru pulz. Vzhledem k magnetickému poli,

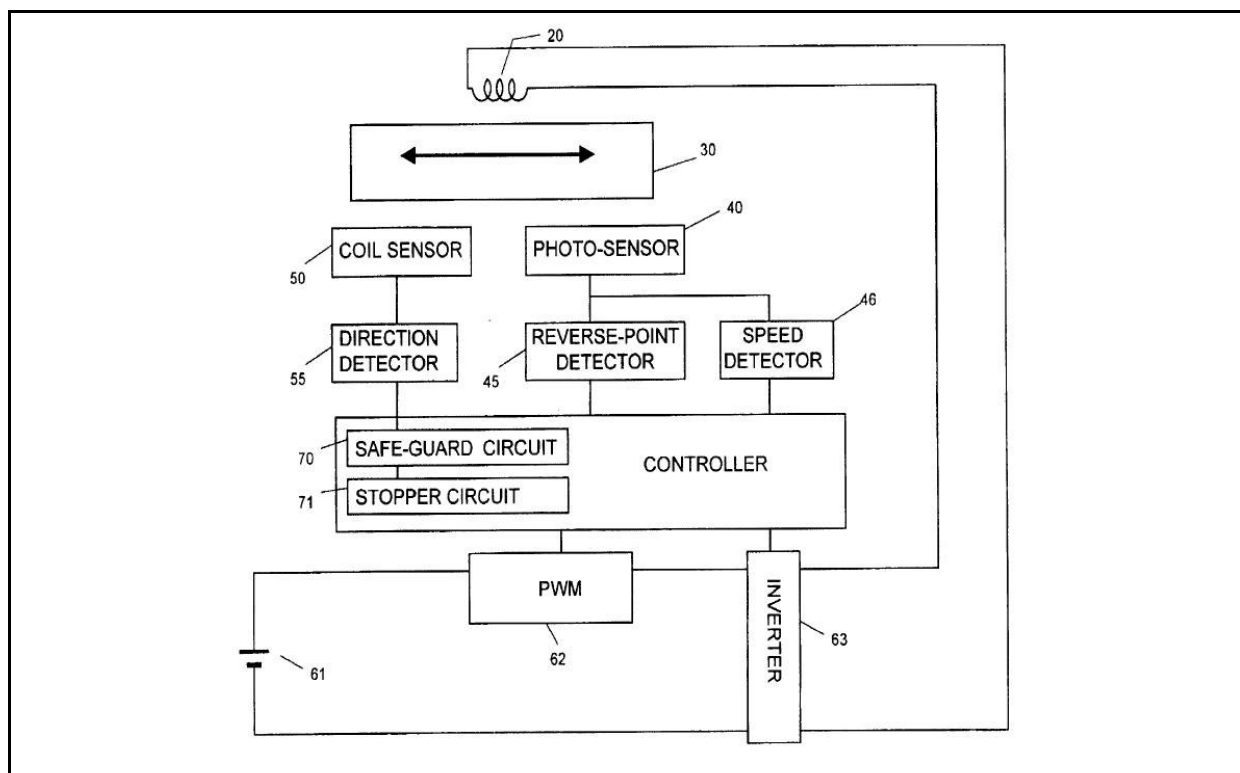
které vzniká v okolí elektromagnetu, je pro snímání pohybu oscilátoru použit foto senzor, u něž nehrozí nebezpečí ovlivnění magnetickým polem. Z výstupního signálu foto senzoru je sledována poloha a rychlost pohybu oscilátoru a dále dosažení pravého/levého bodu zvratu oscilátoru. Indukční senzor sleduje směr pohybu oscilátoru.



Obr. 20: Lineární oscilační motor [15]

Použitý regulátor (viz Obr. 21) zajišťuje regulaci elektrického proudu do elektromagnetu, aby byla pro jakékoliv zatěžující podmínky zajištěna konstantní amplituda oscilací. Na základě výstupních signálů ze senzorů určuje regulátor směr proudu v elektromagnetu, aby působil na oscilátor správným směrem a ve správných časových okamžicích. Pokud by elektromagnet nepůsobil v požadovaný okamžik a ve správném směru, mohlo by dojít k nekontrolovatelnému rozkmitání oscilátoru. Součástí regulátoru je též ochranný obvod 70, jehož úkolem je omezení možnosti, že hnací síla bude působit proti pohybu oscilátoru. V případě nechtěného zastavení motoru, například velkým zatížením, zajistí zastavovací obvod 71 bezpečné odbuzení motoru a odpojení přívodu proudu.

Tento lineární oscilační motor je možné použít například pro pohon holícího strojku nebo jiných řezacích zařízení pracujících na podobném principu nebo pro pohon elektrického zubního kartáčku. [15]



Obr. 21: Blokové schéma lineárního motoru [15]

2.4.5. Lineární oscilační elektrický stroj buzený permanentním magnetem

US Patent 4349757 (1982)

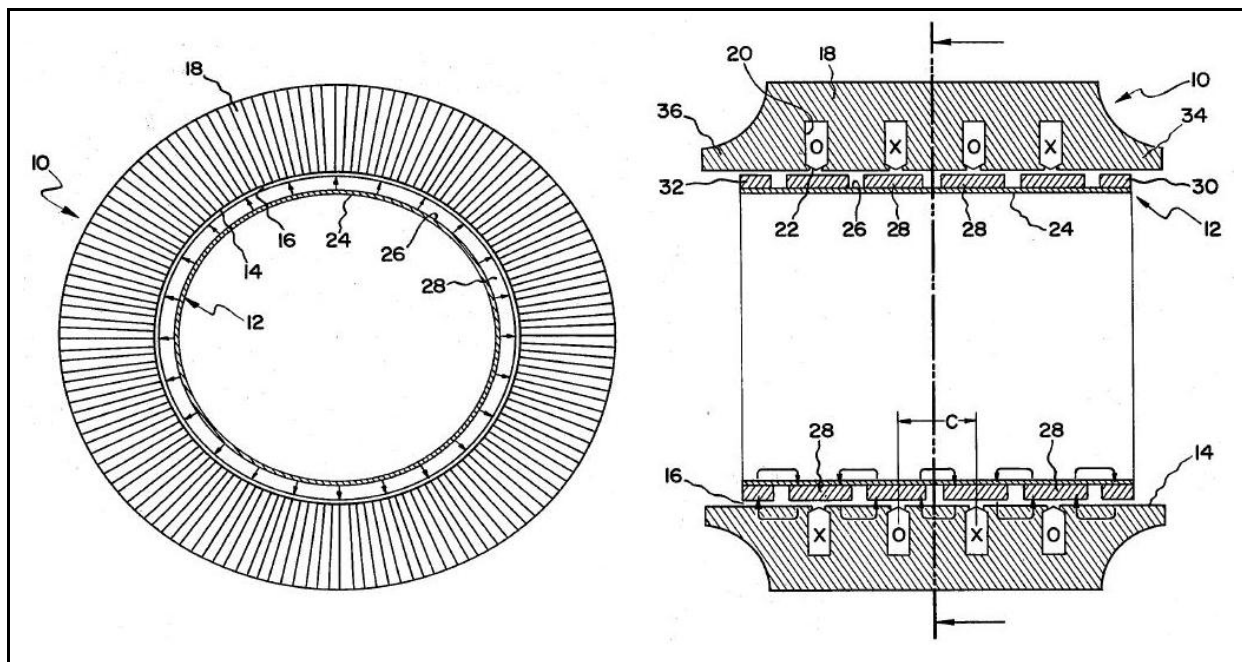
Tento patent se zabývá lineárním oscilačním elektrickým motorem/alternátorem s buzením permanentním magnetem a s omezením magnetického rozptylového toku na okrajích.

Součástí mnoha výkonových aplikací je měnič energie s lineárním mechanickým pohybem, který buď mění lineární mechanický pohyb na elektrickou energii, nebo elektrickou energii na lineární mechanický pohyb. Takový měnič se obvykle označuje jako lineární oscilační motor/alternátor a je složen ze dvou hlavních částí. Jednou částí je lineárně pohyblivý mechanický člen plunžr a druhou částí je pevný stator. Jsou dvě principiální možnosti, jak uvedený lineární mechanický měnič energie provozovat. Je to buď přepínání toku nebo reverzace toku. Pokud je využita možnost přepínání toku, je vinutí stejnosměrného buzení umístěno na statoru stejně jako hlavní vinutí. Magnetický spřažený tok hlavního vinutí je přepínán mezi dvěma úrovněmi jedné polaroty podle toho, ve které ze dvou krajních poloh se nachází plunžr. V případě reverzace toku je zdroj elektromotorické síly umístěn na plunžru. Vinutí je umístěno na statoru a tok se pohybuje mezi kladným a záporným maximem, jak se plunžr

pohybuje mezi krajními polohami. V obou případech je postačující, aby se vůči ostatním částem stroje pohyboval pouze magnetický obvod. Na základě tohoto předpokladu lze vytvořit extrémně lehký plunžr.

Uvedený lineární elektrický motor/alternátor s buzením permanentním magnetem (viz Obr. 22) má lehký plunžr 12, který je tvořen tenkou skořepinou 24. Stroj pracuje s velkou účinností, které se dosahuje díky nízkým ztrátám vířivými proudy. Ztráty vířivými proudy jsou způsobeny vlivem měnícího se směru toku, jenž udržuje konstantní tok v magnetickém obvodu pohybujícího se plunžru. Válcový plunžr je umístěn pohyblivě uvnitř válcového statoru 10, na kterém je navinuto několik kruhových cívek 22. Vnější průměr plunžru je o něco menší než vnitřní průměr statoru. Plunžr se pohybuje v kluzných ložiscích, která při axiálním pohybu udržují jeho polohu v radiálním směru, a tak udržují malou vzduchovou mezeru mezi plunžrem a státorem. Statorové cívky jsou polarizovány střídavě proti sobě a jsou připojeny ke zdroji střídavého proudu nebo k zátěži v závislosti na tom, zda je stroj použit jako motor nebo jako alternátor. Na plunžru je umístěno několik kruhových permanentních magnetů 28, jejichž magnetická pole směřují proti sobě. Střed magnetů jsou totožné se středy cívek s rozestupy C mezi magnety, odpovídající mezerám mezi drážkami jednotlivých cívek 20. Na obou koncích plunžru jsou přidány poloviční magnety 30 a 32. Cílem tohoto uspořádání je omezení rozptylu magnetického toku koncových cívek, magnety také přispívají k udržení konstantní vzduchové mezery, a tak udržují konstantní odpor magnetického obvodu i v případě, že je plunžr v krajní poloze na opačném konci. Pokud by nebyly koncové magnety použity, mohlo by to způsobit značné kolísání toku koncových cívek, což by vedlo k velkému omezení velikosti působící síly nebo velikosti napětí indukovaného v cívce. Kolísáním intenzity magnetického toku by v koncích skořepiny docházelo ke ztrátám vířivými proudy, proto je na obou koncích statoru vytvořeno prodloužení 32 a 34 pro zajištění homogenního střídavého magnetického toku vinutí a konstantního magnetického toku plunžru.

Jednou z možností použití tohoto stroje může být generátor elektrické energie ve spojení se Stirlingovým motorem. [16]



Obr. 22: Lineární oscilační elektrický stroj s buzením permanentním magnetem [16]

2.4.6. Lineární oscilační pohon pro malé aplikace

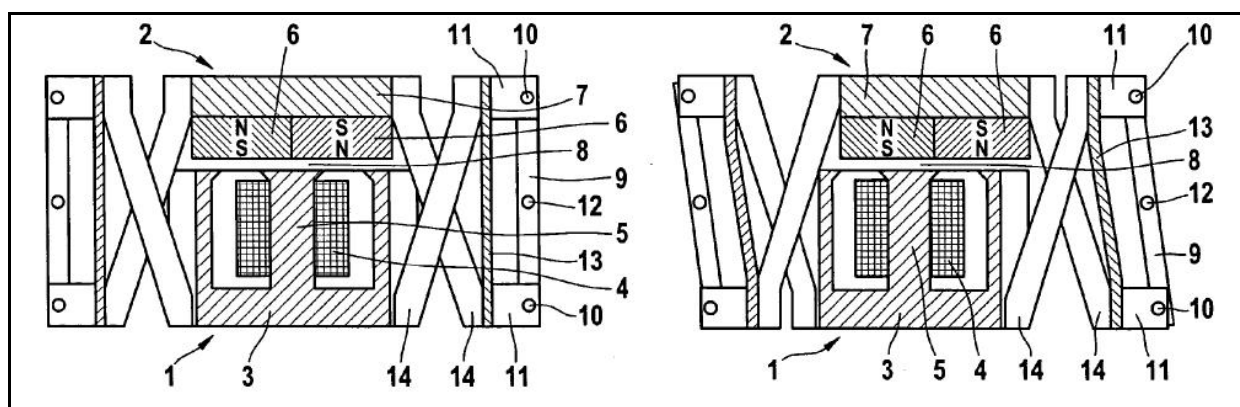
US Patent 20050127759 (2005)

Patent se zabývá návrhem lineárního a rotačního oscilačního pohonu s malou amplitudou nebo malým momentem pro malé aplikace.

Pohon je složen ze dvou pohyblivých těles 1 a 2 (viz Obr. 23). Těleso 1 obsahuje železné jádro 3 ve tvaru E, na jehož střední části 5 je navinuta cívka 4. Součástí tělesa 2 jsou dva permanentní magnety 6, které jsou připevněny s opačnou polaritou vedle sebe na nosné železné desce 7. Při průchodu elektrického proudu vinutím cívky dojde k vytvoření magnetického pole, působícího na permanentní magnety. Permanentní magnety jsou od jádra s vinutím odděleny vzduchovou mezerou 8. Železná deska nesoucí permanentní magnety je na obou stranách zavěšena na železné jádro prostřednictvím distančních sloupků 9. Obě tělesa jsou k distančním sloupkům rotačně připojena v osách 10. Uprostřed distančních sloupků jsou otvory 12, které slouží k připevnění pohonu do rámu, například krytu spotřebiče. Pohonné prvky jsou pružně pohyblivě spojeny prostřednictvím vloženého pružného elementu a upraveny tak, že vzájemně lineárně oscilují s opačnou fází. V tomto pohonu je jako pružný element použita listová pružina 13, která je umístěna paralelně k distančním sloupkům. Pružina vyvíjí vratnou sílu, působící proti vzájemnému vychýlení. Výhodou tohoto systému je vyšší vzájemná rychlost mezi pohonnými prvky oproti běžnému systému, kdy se jeden prvek pohy-

buje a druhý zůstává v klidu. Vzhledem k tomu, že účinnost pohonu je přímo úměrná rychlosti pohonu, lze u tohoto pohonu dosáhnout poměrně vysoké účinnosti. V uspořádání cívky na jednom prvku a magnet na druhém lze z pohonu poměrně malých rozměrů získat relativně výkonný pohon, jehož příkon je dostatečně nízký pro použití v aplikacích napájených bateriemi. Stejně hmotnosti obou pohonných prvků zajistí nízkou úroveň přenosu vibrací do poháněného zařízení. Pohonné prvky jsou v části 11 uloženy v lineárním vedení, které zaručuje přesný pohyb. Při provozu kmitají tělesa 1 a 2 v horizontálním směru, takže se celková délka pohonu v horizontálním směru zvětšuje. Systém uchycení obou částí pohonu způsobuje, že se při provozu těžiště pohybují vzájemně proti sobě. Pákový mechanismus 14 zajišťuje, že při pohybu se těžiště tělesa 1 přesunuje mírně dolů, a naopak těžiště tělesa 2 se přesunuje mírně nahoru. Vzduchová mezera mezi tělesy je nejmenší v rovnovážné poloze a největší, když jsou tělesa vysunuta v maximálních krajních pozicích. Frekvence oscilačního pohybu pohonu je dána napájecí frekvencí cívky, nastavením správné napájecí frekvence lze pohon provozovat v rezonanci.

Tento lineární oscilační pohon lze použít například pro elektrické holící strojky nebo rotační oscilační pohon jako pohon elektrického zubního kartáčku. [17]



Obr. 23: Pohon pro malé aplikace [17]

2.4.7. Lineární motor

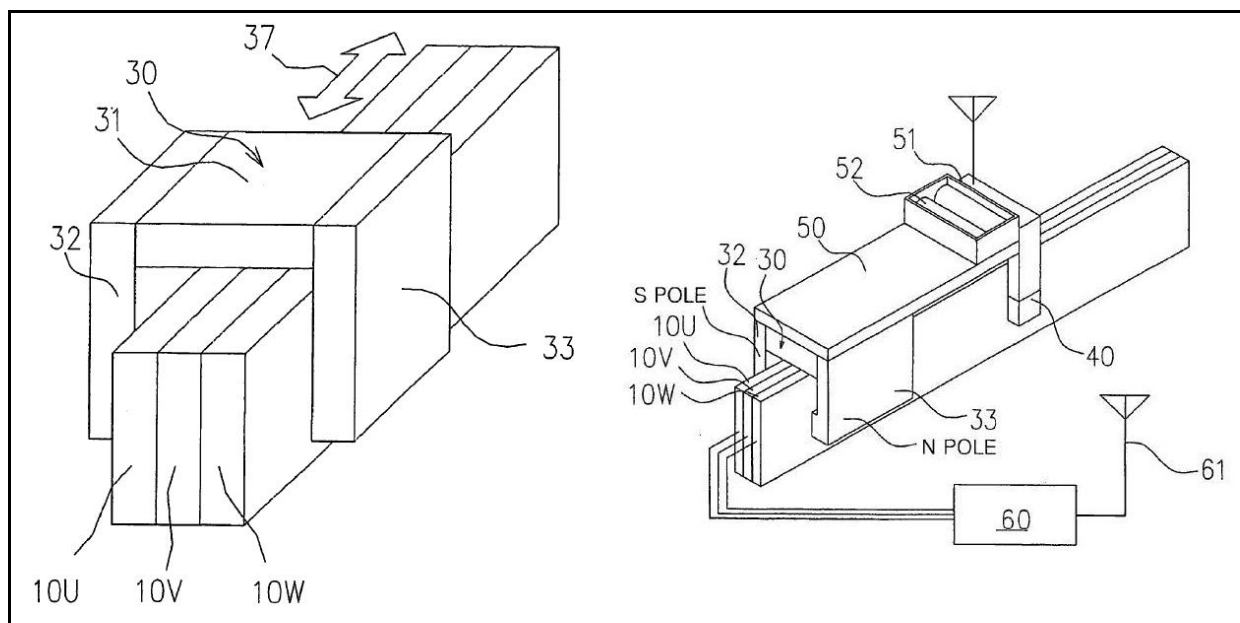
US Patent 20070035184 (2007)

Patent se vztahuje k magnetickému třífázovému lineárnímu motoru s možností provozu a polohového řízení bez lineární stupnice.

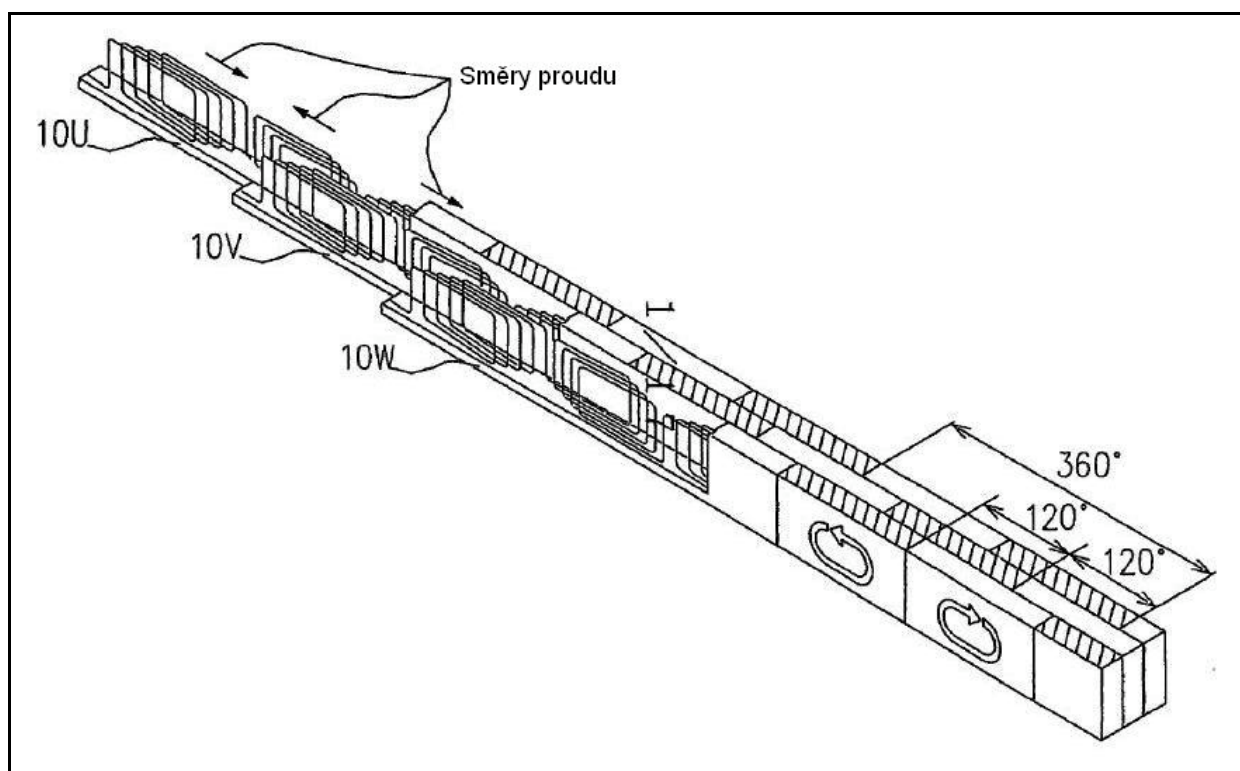
Lineární motor je složen ze statorové části a pohyblivé části (jezdce). Statorová část je tvořena několika permanentními magnety nebo elektromagnety uspořádanými vedle sebe ve

směru pohybu. Jezdec je vytvořen vinutím cívky. Mezi statorem a jezdce je vzduchová mezera. Důležité je napájet cívku takovým elektrickým proudem, který odpovídá hmotnosti jezdce a zátěži na něm umístěné. Pokud bude pohyblivá cívka napájena z baterie umístěné na jezdci, není nutné instalovat přívodní pohyblivé vedení. Vinutí jezdce se při provozu zahřívá, takže je třeba řešit také chlazení. Pokud je ovšem vinutí cívky jezdce nahrazeno permanentním magnetem, uvedené nevýhody odpadají. Takový lineární motor je tvořen statorovou částí, obsahující několik vinutí zapojených v sérii, a uspořádaných vedle sebe ve směru pohybu. Dále jezdce tvořeným jedním nebo více permanentními magnety. Lineární pohon dále potřebuje odměřovací systém, aby bylo možné zastavit jezdce na předem určené pozici. Lineární pohony jsou často vybaveny lineární stupnicí podél statoru a magnetickým snímačem na jezdci. Tak je možné detekovat polohu jezdce a řízením velikosti proudu procházejícího statorovým vinutím je možné jezdce ovládat. Bohužel lineární stupnice přináší určité problémy, například vyšší cena u součástí a vyšší náklady na provoz a údržbu. Proto zde uvedený lineární motor umožňuje provoz a polohové řízení i bez lineární stupnice. Na statoru je N vinutí podle počtu fází. V případě třífázového motoru jsou vinutí tři. Vinutí každé fáze U, V a W je složeno z určitého množství párů cívek podle délky statoru navinutých tak, že polovina jednoho páru je navinuta ve směru hodinových ručiček a druhá půlka je navinuta v opačném směru (viz Obr. 25). Cívky jednoho páru jsou uspořádány vedle sebe podél statoru a spojeny do série. Všechny ostatní páry jedné fáze jsou řazeny za sebou podél statoru a taktéž jsou sériově propojeny. Jestliže rozdíl mezi dvěma páry jedné fáze je 360° , cívka druhé fáze je posunuta o $360^\circ / N$ za cívkou první fáze a cívka třetí fáze je posunuta o $360^\circ / N$ za cívkou druhé fáze. Pohyb jezdce je ovládán řízením velikostí proudů do vinutí jednotlivých fází na základě informace o poloze jezdce z hallové sondy 40 (viz Obr. 24), určení polohy bude přesnější při použití více hallových sond. Hallova sonda je umístěna na jezdci v poloze mimo střed magnetu ve směru pohybu. Vinutí jednotlivých fází jsou uspořádána vedle sebe ve směru působení magnetického pole. Jezdec 30 má tvar obráceného U a skládá se z magnetu 31 a jha 32 a 33. Pokud je na jezdci umístěno více magnetů, jsou řazeny vedle sebe s opačnou polaritou ve směru pohybu. Signál z hallové sondy je bezdrátově přenášen ve formě rádiového nebo optického signálu do regulátoru 60. Pro přenos signálu je na jezdci připevněn oscilátor 51 s anténou, napájený bateriemi 52. Vysílaný signál přijímá pevná anténa 61 připojená k regulátoru.

Uvedený lineární motor je možno použít například v továrnách jako dopravníky například pro součástky nebo hotové výrobky. [18]



Obr. 24: Lineární motor [18]



Obr. 25: Vinutí fází lineárního motoru [18]

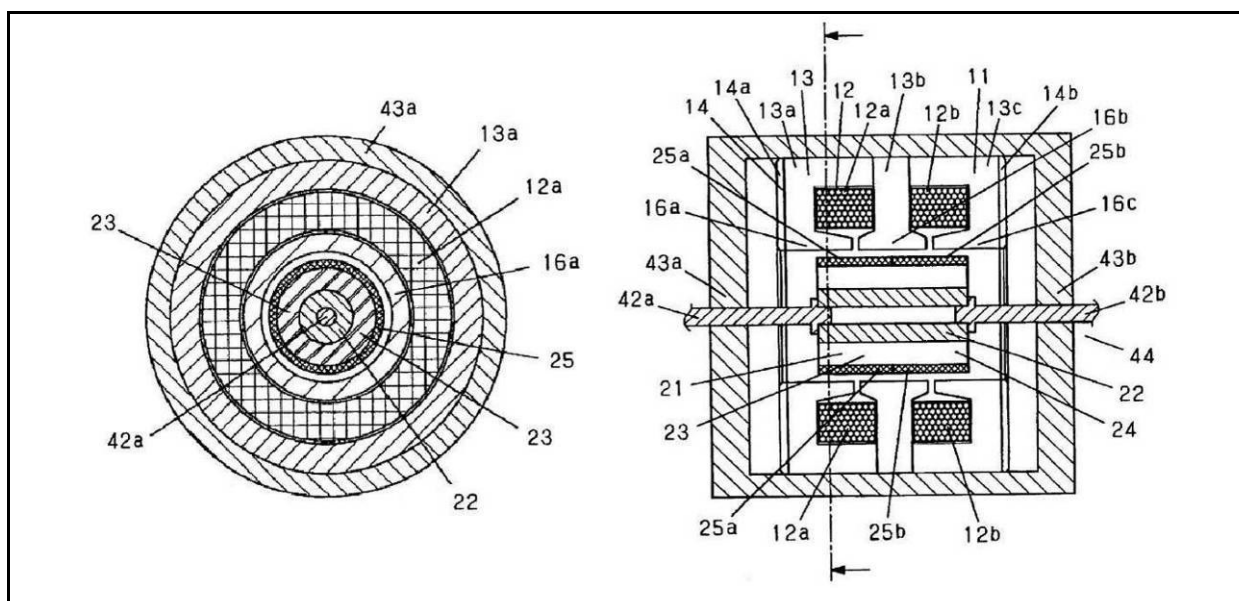
2.4.8. Lineární kompresor poháněný lineárním motorem

US Patent 6946754 (2005)

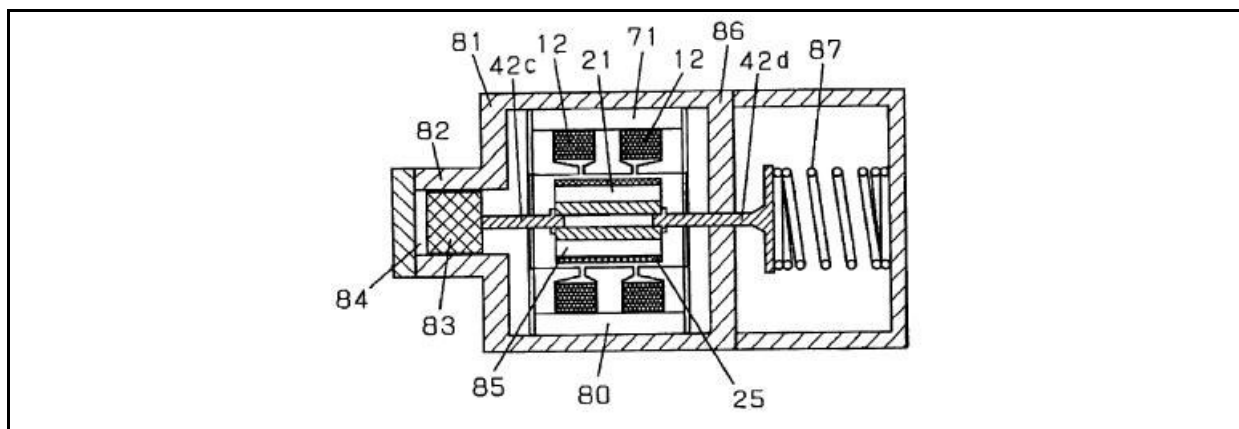
Uvedený patent se vztahuje k lineárnímu kompresoru poháněnému lineárním motorem, který dosahuje vyšší účinnosti použitím menších a lehčích magnetů ze vzácných zemin.

Lineární motor (viz Obr. 26) sestává z válcového statoru 11 složeného ze statorového jádra utvářejícího magnetické póly 13 a prstencového vinutí 12 navinutého na statorové jádro. Statorové jádro je složeno z plechů a je spojeno pomocí čel 14. Ve středu statoru je vložena pohyblivá část 21 sestávající z pohyblivého válcového jádra 24, na jehož vnější straně jsou přilepeny magnety 25. Magnety jsou umístěny vedle sebe s opačnou polaritou tak, že pokud sever jednoho magnetu je blíže k vzduchové mezeře, a jih tohoto magnetu směřuje k ose lineárního pohybu, konfigurace druhého magnetu je přesně opačná. Pohyblivé jádro je složeno z železného středu 22, na kterém jsou navrstveny plechy 23. Díky tomu, že jsou magnety lineárního motoru vyrobeny ze vzácných zemin, mohou být tenčí, tudíž mají i nižší hmotnost a motor může pracovat s vyšší účinností.

Popisovaný lineární motor lze použít pro pohon kompresorů v chladicích systémech (viz Obr. 27). Tělo kompresoru tvoří válec 82 s kompresní komorou 84, ve které se pohybuje válcový píst 83. Píst kompresoru je prostřednictvím hřídele 42 připojen k aktuátoru lineárního oscilačního motoru. Pokud bude aktuátor lineárního motoru připojen ke zdroji mechanického lineárního oscilačního pohybu, lze uvedený stroj použít též jako zdroj elektrické energie. [19]



Obr. 26: Lineární motor pro pohon lineárního kompresoru [19]



Obr. 27: Lineární kompresor [19]

2.4.9. Lineární elektrický generátor

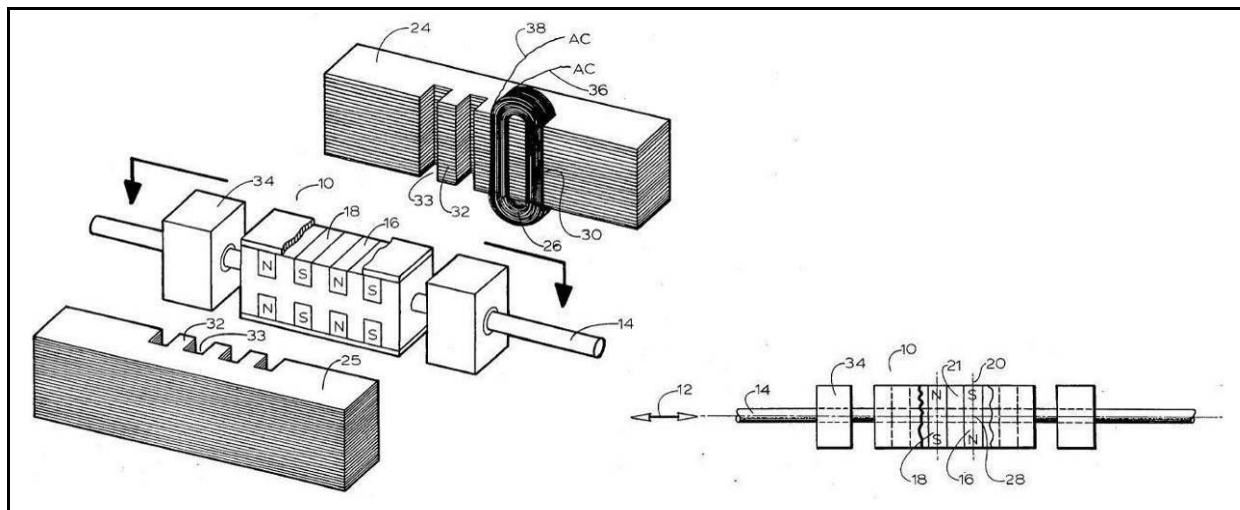
US Patent 4500827 (1985)

Tento patent představuje lineární elektrický generátor s oscilačním magnetickým jádrem, které je poháněno mechanickým oscilačním zdrojem.

Hlavní části elektrického generátoru tvoří pohyblivé magnetické jádro a stator (viz Obr. 28). Magnetické jádro 10 je spojeno se zdrojem lineárního oscilačního pohybu 12. Dále je tvořeno vodící tyčí 14, na které je připevněno několik permanentních magnetů 16 a 18, umístěných za sebou ve vzdálenosti 21 střídavě s opačnou polaritou. Směr magnetického pole permanentních magnetů je dán osou 20, která je kolmá na směr pohybu jádra. Na statoru 24 a 25 tvořeném spojením železných plechů, jsou celkem čtyři vinutí 26, po dvou na každé straně. Vinutí jsou umístěna vedle sebe ve směru oscilačního pohybu jádra. Cívka každého vinutí má střed 32 stejně široký jako vzdálenost mezi magnety 21, o stejnou vzdálenost jsou posunuty také strany sousedních cívek 30. Na každou cívku statorového vinutí připadají dva sousední permanentní magnety s opačnou polaritou a na každé takové seskupení připadá jeden usměrňovač napětí, které se indukují ve vinutí při oscilačním pohybu jádra. Pro maximalizaci účinnosti generátoru nebo pohonu tvořeného tímto strojem je důležité umístit magnety co nejbližší statorovému vinutí, a tak minimalizovat vzduchovou mezeru mezi pohyblivým jádrem a státorem.

Takový elektrický stroj lze použít jako vibrační generátor elektrické energie přeměnou mechanické energie vibrací při jízdě automobilu po silnici. Mezi další využití lze zařadit na-

příklad elektrický generátor ve větrných elektrárnách nebo generátor elektrické energie z energie pohybu mořských vln. [20]



Obr. 28: Lineární elektrický generátor [20]

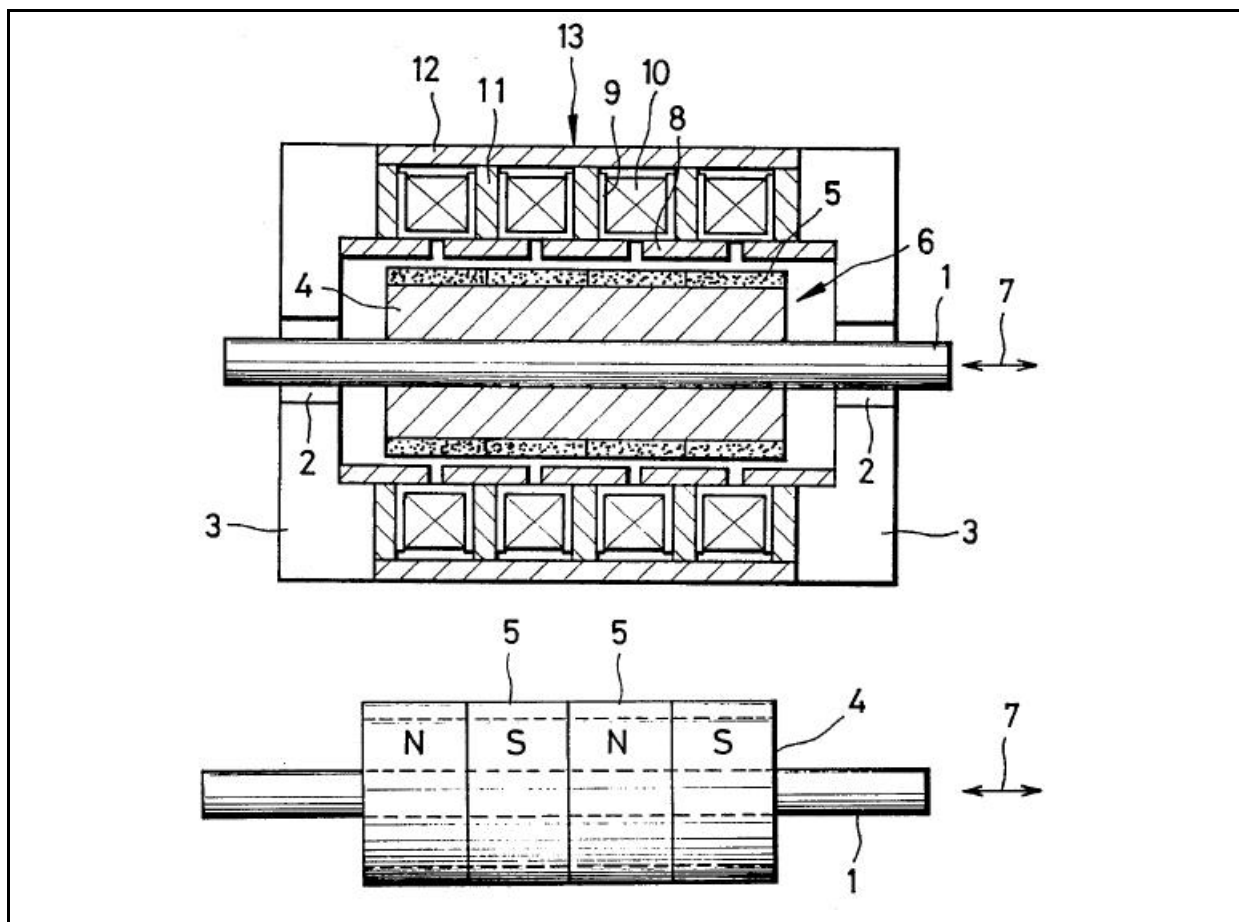
2.4.10. Lineární generátor

US Patent 4924123 (1990)

Tento patent se týká lineárního generátoru vytvářejícího elektrické napětí přímo úměrné rychlosti oscilací pohyblivého členu s jeho přesným vedením.

První ze dvou částí lineárního generátoru je pohyblivé jádro 6 (viz Obr. 29). Jádro tvoří hřídel 1, která je připojená ke zdroji mechanického oscilačního pohybu 7. Hřídel je vedená v kluzných ložiscích 2 umístěných ve štítech 3. Hřídel 1, ložiska 2 a štíty 3 jsou vyrobeny z nemagnetického materiálu. Na hřídeli je dále nasazeno jho 4, na kterém jsou připevněny permanentní magnety 5. Magnety jsou umístěny těsně vedle sebe střídavě s opačnou polaritou, směr magnetického pole permanentních magnetů je kolmý na směr pohybu. Délka permanentních magnetů je stejná jako délka zdvihu oscilačního jádra. Druhou částí je stator 13. Stator se skládá z prstencových cívek 10 navinutých na kotouče 9, pólových nástavců 8, jha 11 a krytí 12. Statorové části jsou kromě kotoučů 9 vyrobeny z magnetického materiálu. Krytí 12 tvoří spolu se štíty 3 vnější část stroje.

Jedním z možných způsobů použití uvedeného lineárního generátoru je výroba elektrické energie ve spojení s mechanickým zdrojem, například stirlingovým motorem. Díky závislosti výstupního napětí na rychlosti oscilačního pohybu jádra lze uvedený stroj použít též jako snímač rychlosti. [21]



Obr. 29: Lineární generátor [21]

2.4.11. Lineární generátor elektrické energie 2

US Patent 5818132 (1998)

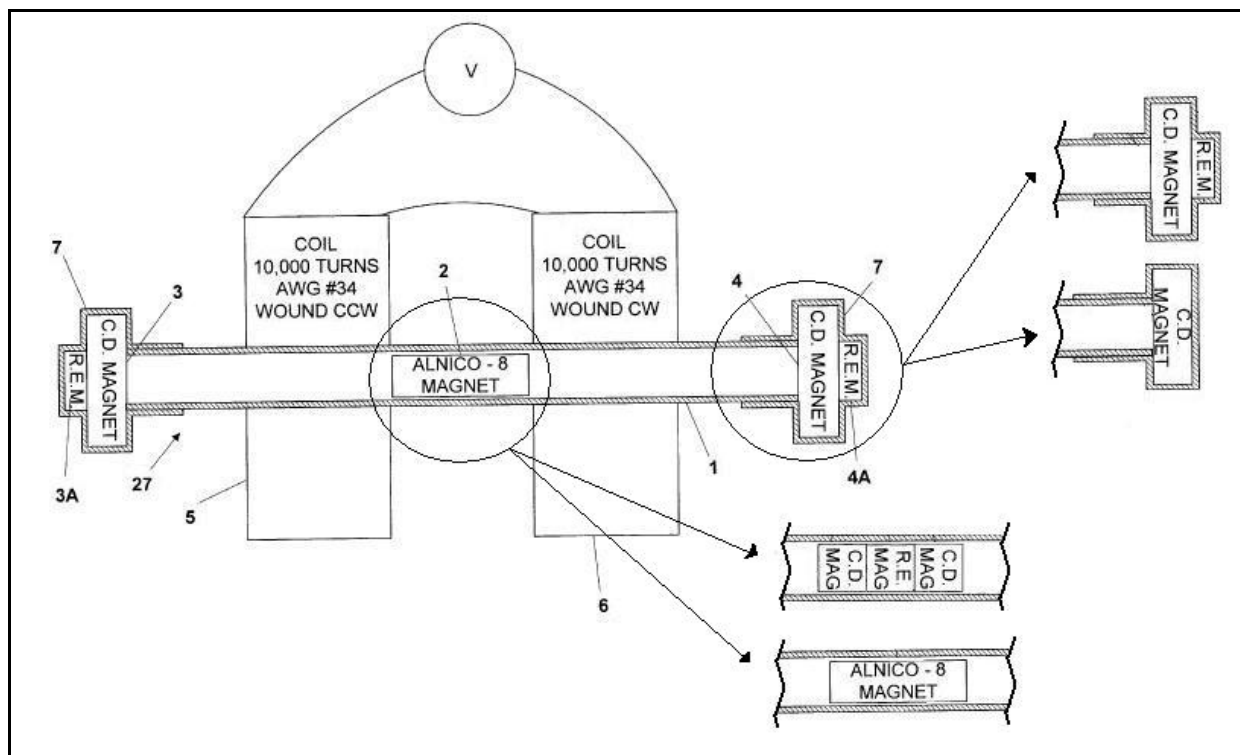
Uvedený patent se zabývá návrhem zařízení umožňujícího přeměnu slabého mechanického lineárního pohybu na elektrickou energii. Jedná se o lineární generátor elektrické energie, v jehož konstrukci jsou použity permanentní magnety ze vzácných zemin a keramické diskové magnety.

Jednotka lineárního generátoru 24 (viz Obr. 30) se skládá z tenkostěnné vodící trubice 1, pohyblivého permanentního magnetu 2, dvou koncových permanentních magnetů 3 a 4, cívek vinutí 5 a 6 a koncových krytů 7. Vodící trubice 1 je mosazná, ovšem může být vyrobena i z jiného neželezného materiálu. Pohyblivý permanentní magnet 2 je tyčový magnet ze slitiny Al-Ni-Co nebo Ne-Fe-B. Koncové permanentní magnety 3 a 4 jsou keramické diskové magnety a jsou polarizovány proti pólům pohyblivého permanentního magnetu, aby jej vždy

odpuzovaly, a tak zajišťovaly funkci magnetické pružiny. Když bude jednotka vibrovat a pohyblivý magnet bude donucen se periodicky pohybovat, bude se ve vinutí indukovat napětí. Čím větší vibrace nastanou, tím větší se bude indukovat napětí. Pro dobrou účinnost generátoru je žádoucí, aby se magnet pohyboval v trubici volně, to znamená, že kolem magnetu musí být dostatečná vzduchová mezera, aby okolní vzduch mohl volně proudit a nebrzdil magnet v pohybu. Dále je třeba, aby cívkami vinutí procházel pokud možno co největší magnetický tok. Omezujícím faktorem délky životnosti zařízení je slábnoucí síla magnetu. Magnety ze vzácných zemin, např. Ne-Fe-B, jsou nejlepší magnetické materiály poskytující silné magnetické pole a dlouhou životnost, jejich hlavní nevýhodou je ovšem velká cena rostoucí s rozměry magnetu. Magnet potřebný pro tuto aplikaci musí mít větší délku než průměr proto, aby se nemohl v trubici otočit. Úspory nákladů při konstrukci lze dosáhnout použitím kombinace menšího magnetu ze vzácných zemin nebo Al-Ni-Co s levnými keramickými magnety (viz detaily na Obr. 30). Vinutí jsou přilepena na trubici, rozstup mezi nimi je stejný jako jejich šířka a délka pohyblivého magnetu. Vinutí jsou zapojena sériově, přičemž jedno je navinuto ve směru a druhé proti směru hodinových ručiček, aby indukovaná napětí nepůsobila v protifázi. Délka vodící trubice přímo ovlivňuje citlivost celé jednotky. Bude-li příliš krátká, pohyblivý magnet bude silnými koncovými magnety držen v centrální poloze velkou silou. Naopak pokud bude příliš dlouhá, síla držící magnet bude malá a celková citlivost jednotky bude velká. Důležitá je také orientace – citlivost jednotky se zvýší, pokud bude pracovat ve vertikální poloze, čímž se minimalizuje tření mezi magnetem a trubicí.

Při praktickém použití tohoto generátoru pro napájení různých elektrických zařízení lze požadovaných napěťových a proudových parametrů dosáhnout vhodnou kombinací spojení cívek většího počtu jednotek integrovaných v jednom tělese, případně také použití více cívek a pohyblivých magnetů v jedné jednotce.

Popsané zařízení lze například použít v kombinaci s příslušnou elektronikou pro dlouhodobé napájení signalizačních světel, napájení alarmů nebo komunikačních zařízení umístěných v místech bez možnosti připojení k běžné napájecí síti. Konkrétním využitím tohoto zařízení je přeměna „houpavého“ mechanického pohybu železničního vagónu na elektrickou energii sloužící k napájení satelitního komunikačního zařízení mezi palubní jednotkou a pozemní monitorovací stanicí. Jinou možností je využití silné pulzující síly vznikající při chůzi nebo běhu a její přeměna na elektrickou energii pomocí aplikace podobného mikrogenerátoru v podrážce obuvi. Tuto jednotku lze použít i k měření změn hmotnosti tělesa, případně pro detekci přemístění objektu, například muzejních artefaktů, nebo zkrátka pro generování elektrické energie všude tam, kde se vyskytují vibrace. [22]



Obr. 30: Lineární generátor elektrické energie [22]

2.4.12. Čerpadlo s lineárním pohonem

US Patent 6283720 (2001)

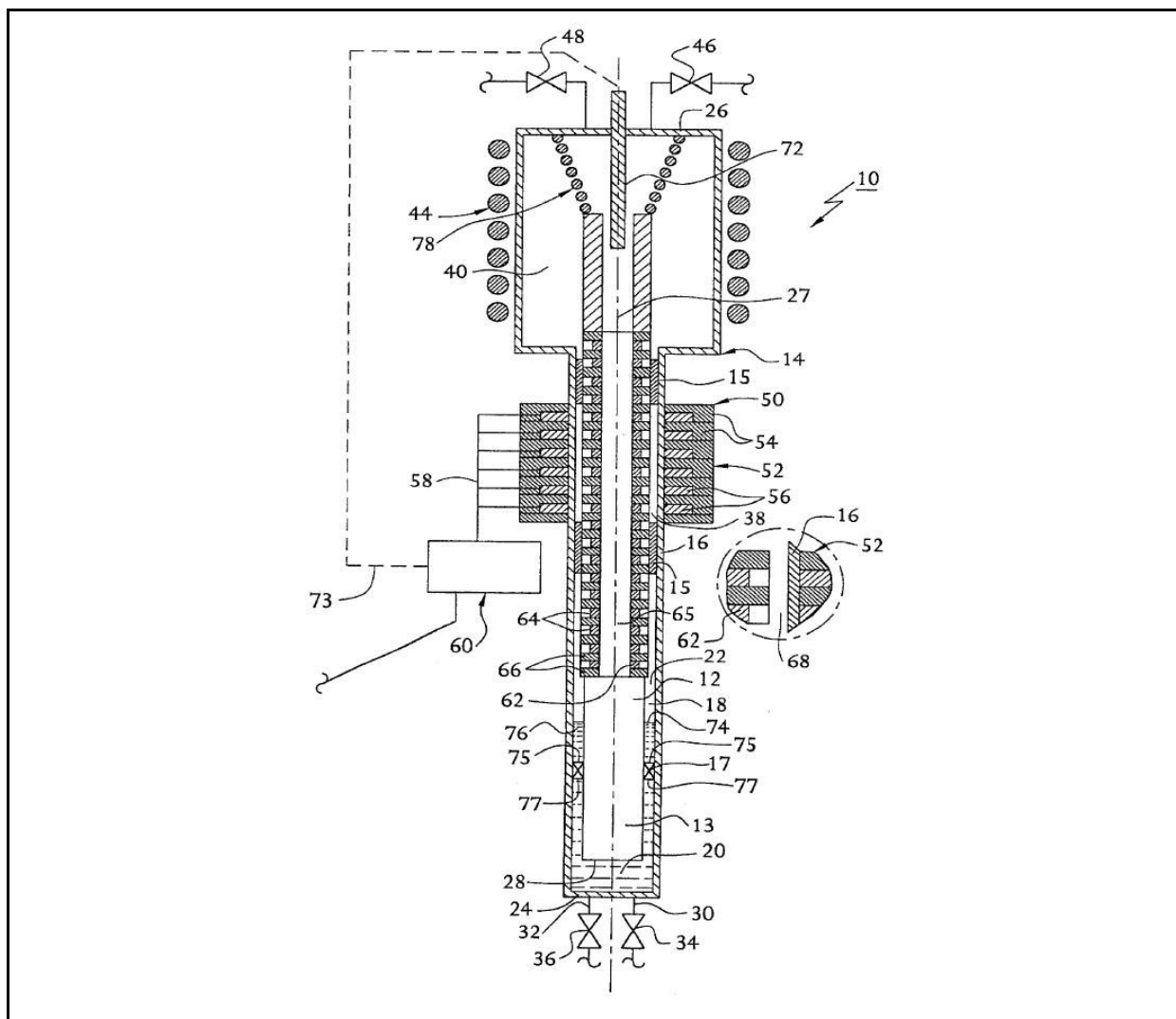
Tento patent se zabývá návrhem hermetického pístového čerpadla poháněného lineárním motorem pro čerpání kapalin a zkapalněných plynů.

Lineární čerpadlo 10 (viz Obr. 31) sestávající z válce 14 tvoří uzavřenou komoru, v níž se pohybuje píst 13, jehož dolní konec funguje jako dávkovací prvek. Válec 14 zahrnuje vnější stěny 16 tvořící uzavřenou komoru 18, ve které je pohyblivě uložen píst 13. Pouzdra 15 slouží k oddělení pohyblivého pístu od vnitřního povrchu stěny 16 válce. Jsou vyrobeny z materiálu s nízkým součinitelem tření a dobrou životností, například z teflonu nebo jiného polymeru umožňujícího suché tření, díky tomu není potřeba používat tekutých maziv. Těsnicí člen 17 umístěný mezi válcem 14 a pístem 13 rozděluje komoru 18 na dávkovací komoru 20 a zádržnou komoru 22. Válec 14 je na obou stranách uzavřen částmi 24 a 26. Mezi pístem 13 a horní částí 26 je umístěna pružina 78. Píst se pohybuje ve směru podélné osy 27. Čerpaná tekutina je buď nasávána do dávkovací komory 20 a proudí přes vtokový ventil 34 a vedení 30, když se píst pohybuje v komoře směrem nahoru, nebo je z dávkovací komory 20 vytlačo-

vána a proudí přes výtokový ventil 36 a vedení 32, když se píst pohybuje směrem dolů. Zádržná komora 22 bývá naplněna stlačitelným médiem, např. plynem, z důvodu omezení pulzování kapaliny proudící do čerpadla a zajištění konstantního toku kapaliny. Ventily 46 a 48 slouží k regulaci tlaku plynu v zádržné komoře. K zajištění potřebného chlazení plynové náplně slouží tepelný výměník 44.

Lineární magnetický pohon generuje lineárně pohyblivé magnetické pole pro pohon pístu. Pohon čerpadla zajišťuje vícefázový lineární motor 50. Motor 50 sestává ze statoru 52 a magnetické kotvy pístu 62. Stator je těsně nasazen na vnější stěnu 16 válce 14 a vytváří magnetickou sílu potřebnou pro pohyb pístu. Stator má prstencový tvar a je složen z magneticky měkkých ocelových plechů 54 a vinutí 56. Pohyblivé magnetické pole statoru je vytvářeno vhodnou modulací elektrického proudu procházejícího vinutím statoru, k čemuž slouží elektronická jednotka a napájecí zdroj 60. Kotva 62 je složena z permanentních magnetů 64 a magneticky měkkých ocelových plechů 66. Kotva má prstencový tvar a je nasazena na centrální hřídeli 65 podél osy 27. V horní části čerpadla je umístěno bezkontaktní magnetostriční čidlo polohy pístu, které je prostřednictvím vedení 73 spojeno s řídicí jednotkou.

Pístová lineární čerpadla najdou uplatnění v řadě aplikací především v prostředích, kde čerpané médium má malou rychlost průtoku a vyšší tlaky. Toto hermetické lineární čerpadlo je navrženo zejména pro čerpání tekutin, které je třeba uchovávat při nižší teplotě než je teplota okolí, protože při stejné teplotě jakou má okolí se vyskytují pouze v plynné formě. Jedná se především o zkapalněné průmyslové plyny, typickým příkladem může být dusík, kyslík, argon, vodík, helium, metan apod. [23]



Obr. 31: Čerpadlo s lineárním pohonem [23]

2.4.13. Lineární motor s permanentními magnety

US Patent 5175455 (1992)

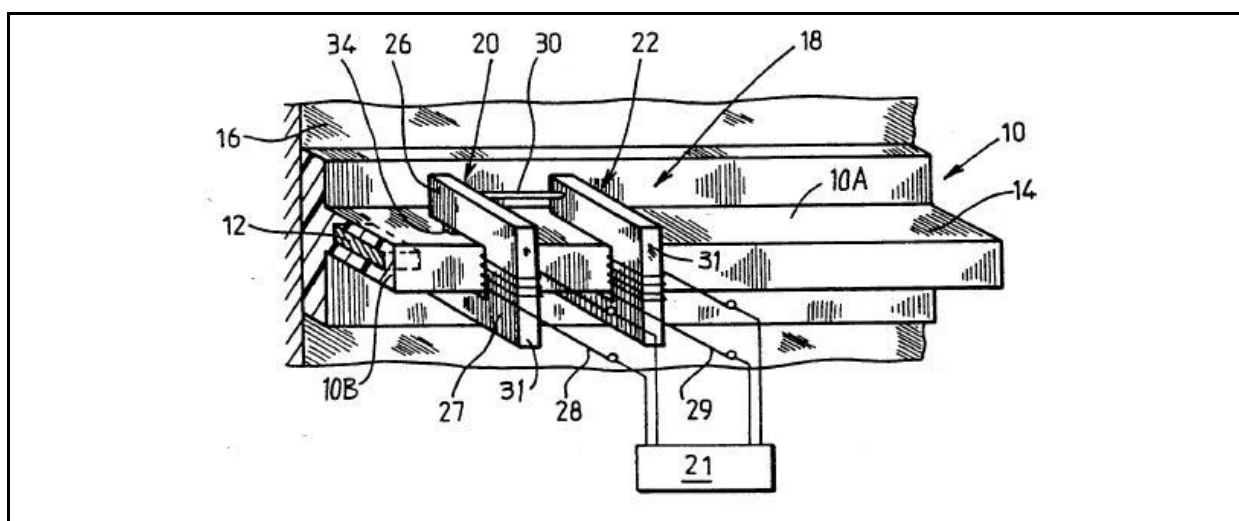
Cílem tohoto patentu bylo vytvořit účinný lineární motor s permanentními magnety, který by byl snadno říditelný a jehož konstrukce by byla zároveň kompaktní a lehká.

Lineární motor tvoří dva moduly. První modul 10 lineárního motoru obsahuje řadu několika permanentních magnetů 12 (viz Obr. 32), které jsou uspořádány nehybně a odděleny stejnými mezerami. Magnety jsou uspořádány tak, že jejich severní a jižní póly se pravidelně střídají. Pokud je první magnet natočen svým severním pólem nahoru, druhý magnet je natočen severním pólem dolů atd. Druhý modul 18 lineárního motoru je složen minimálně

z jednoho páru elektromagnetů 20, 22, které tvoří jádro tvaru U, na němž je navinuto vinutí 28, 29. Elektromagnety jsou od sebe odděleny distanční tyčkou 30 udržující konstantní vzdálenost takovou, že pokud se první elektromagnet nachází v mezeře mezi prvním a druhým permanentním magnetem prvního modulu, tak druhý elektromagnet je nad třetím permanentním magnetem prvního modulu. O chod pohonu se stará jednotka 21, která obsahuje regulátor a napájecí zdroj. Na základě informací z Hallovy sondy 34 dodává potřebný proud do vinutí elektromagnetů.

Mezi výhody popisovaného lineárního motoru patří snadné řízení rychlosti pohyblivého modulu, velký magnetizační proud a hnací síla. Změna směru magnetizačního proudu způsobí brzdění a následně změnu směru pohybu pohyblivého modulu. Tento systém lze také využít jako generátor energie – pokud se bude pohyblivý modul pohybovat v magnetickém poli permanentních magnetů, bude se v jeho vinutí indukovat napětí. Přesnost polohování pohonu je přímo závislá na velikosti mezery mezi permanentními magnety. V případě dvou elektromagnetů popisovaných v tomto článku je přesnost půl mezery mezi permanentními magnety. Spojíme-li dohromady několik pohyblivých modulů, které mají mezi sebou různé vzdálenosti, lze vytvořit posuvné měřítko (náhradu za nonius, pravítko, měřítko).

Tento lineární motor lze využít k pohonu dveří, například posuvných dveří výtahu, či automaticky otvíraných posuvných dveří. Jinou možností využití je pohon protizávaží, je ale třeba uvážit, že v takovém případě jsou působící síly mnohem větší, a proto je třeba zřetězit několik takových pohonů dohromady. Tento patent by se dal využít i ke konstrukci posuvného měřítka či pravítek posuvů pro přesné obráběcí stroje nebo podobné přesné automaty. [24]



Obr. 32: Lineární motor s permanentními magnety [24]

3. ZHODNOCENÍ PATENTŮ

Takřka všechny zmíněné patenty pracují na stejném principu a mají podobnou funkci. Mnohé mají i téměř stejnou nebo podobnou konstrukci. Vzhledem k jednoduché konstrukci je také patrné, že většina uvedených patentů se zabývá pouze zdokonalením funkce, případně zdokonalením konstrukce původní myšlenky. Veškeré nové patenty jsou vesměs odlišné pouze v detailech nebo je snahou zlepšit provozní vlastnosti pohonu. Všechny uvedené patenty lze provozovat jak v režimu generátorovém, tak v režimu motorovém, čehož se dosáhne vhodnou konfigurací. Výhodou většiny uvedených patentů je celem jednoduchá konstrukce, což příznivě ovlivňuje bezúdržbový a spolehlivý provoz. Dále je výhodou také možnost případné miniaturizace konstrukce a snadné implementovatelnosti. Lze vytvořit kompaktní malý silný zdroj síly pro účely pohonu různých zařízení a pro účely implementace do různých zařízení a mechanismů. Výhodou takové konstrukce je, že při její realizaci lze použít materiály, které vyžadují některé aplikace, například ušlechtilých nebo biokompatibilních materiálů. Takový pohon pak lze použít v některých zvláště citlivých oblastech jako je zdravotnictví, potravinářský průmysl a další, kde jsou požadavky na konstrukce použitých zařízení zvláště vysoké a prostředí, ve kterých jsou taková zařízení provozována, mohou být zvláště agresivní. Je nutné, aby zařízení během svého provozu žádným způsobem neovlivňovalo okolí ani látky, na které působí a které se s ním dostanou do styku.

Velkou výzvou při konstrukci jakéhokoliv zařízení je v souladu s trendem, který panuje a zasahuje do všech oblastí lidského konání v dnešní době, dosažení příznivé ceny, a to jak pořizovací, tak provozní během celého životního cyklu zařízení. Z toho také vychází požadavky na energeticky úsporný a ekologický provoz takového pohonu.

Pro účely stanovené v zadání této práce je vhodné, aby byl pohon proveden s bezkontaktním pohyblivým členem. Toto většina popsaných patentů splňuje, výjimkou je patent popsaný v kap. 2.4.6. Při konstrukci uvedených pohonů se ve velké míře využívá jedinečných vlastností permanentních magnetů ze slitin kovů vzácných zemin (Ne-Fe-B, Sm-Co), které umožňují vytvoření pohonů disponujících velkou magnetickou silou při zachování kompaktních rozměrů.

Lineární oscilační pohon má určitá specifika. Je výhodné jej provozovat v rezonanci, neboť tak lze dosáhnout výrazných energetických úspor při jeho provozu. Další možností je také zapojit do systému pružinu, která se v jedné části oscilačního cyklu chová jako akumulátor pohybové energie a v druhé části cyklu vrací akumulovanou energii do systému.

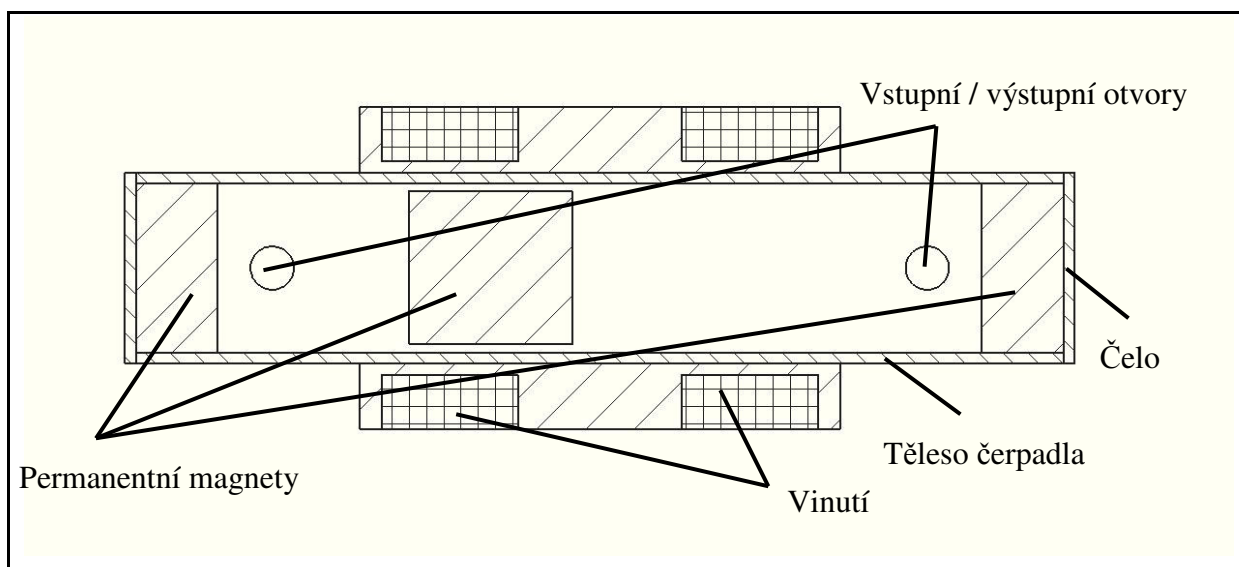
V této práci je hlavní pozornost věnována především strojům pracujícím v režimu motorovém, aby se vytvořený model dal použít pro pohon mechanického zařízení, například čerpadla. Dále je potřeba, aby byl pohon oscilační a všechny zmíněné patenty mohou po větších či menších úpravách takto fungovat, přičemž většina z uvedených patentů je od prvopočátku uvažována jako oscilační.

Cílem této práce je vytvořit koncepci pohonu, který bude oscilovat mezi dvěma krajními polohami, tudíž není zapotřebí žádné přesné polování, proto se jeví jako výhodné vycházet z některého z návrhů popsaného například v kap. 2.4.2, 2.4.8, 2.4.10 nebo 2.4.11. Výhodné by mohlo být také použití Hallbachova uspořádání permanentních magnetů, o kterém je zmínka např. v kap. 2.3.3. Přínosem tohoto uspořádání je, že tato soustava permanentních magnetů působí v jednom směru velmi silným magnetickým polem, zatímco v opačném směru je magnetické pole naopak velmi slabé (viz Obr. 13).

4. NÁVRH KONSTRUKCE LINEÁRNÍHO POHONU

4.1. Návrh konstrukce 1

První návrh konstrukce modelu (viz Obr. 33) vychází z patentů uvedených v kapitolách 2.4.2 a 2.4.11. Jedná se o permanentní magnet umístěný v magneticky nevodivé trubici pohybující se mezi dvěma dalšími permanentními magnety a zajišťující funkci magnetické pružiny. Trubice funguje též jako těleso čerpadla, přes které proudí nasávaná / vytlačovaná tekutina. Pohyb magnetu by mělo zajišťovat vinutí, které je navinuto na přípravku nepohyblivě fixovaném na trubici. Další variantou by mohlo být nahrazení magnetické pružiny klasickou pružinou, případně úplné vynechání pružin.

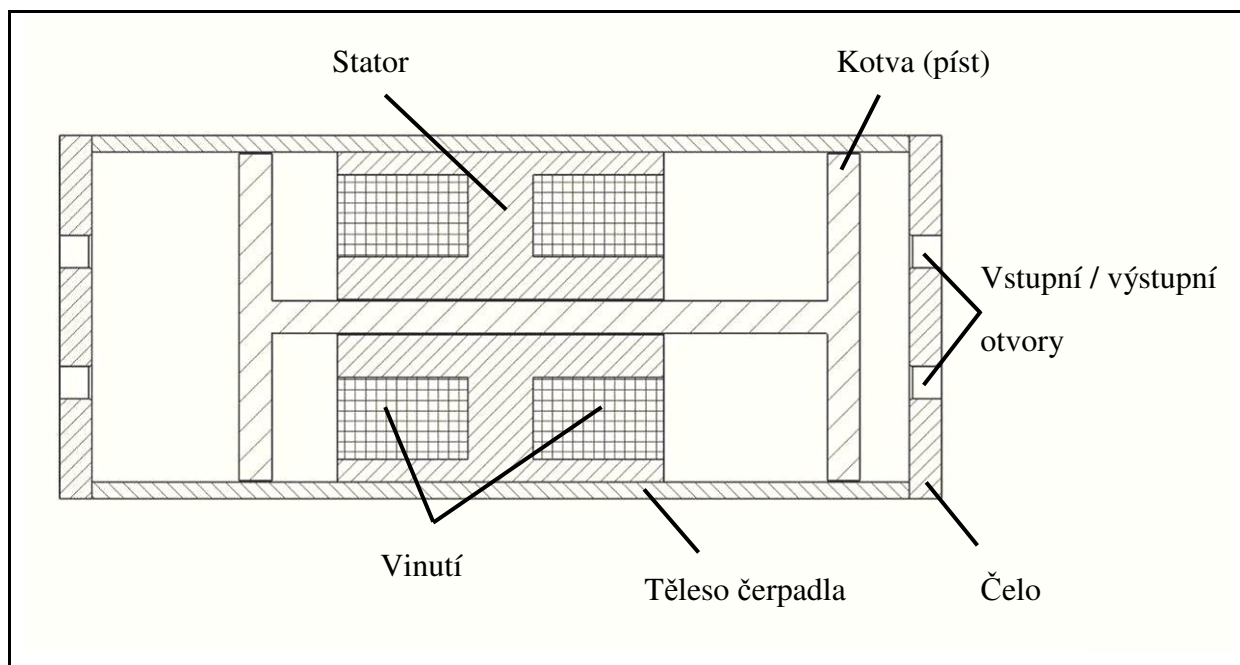


Obr. 33: Lineární oscilační pohon – návrh 1

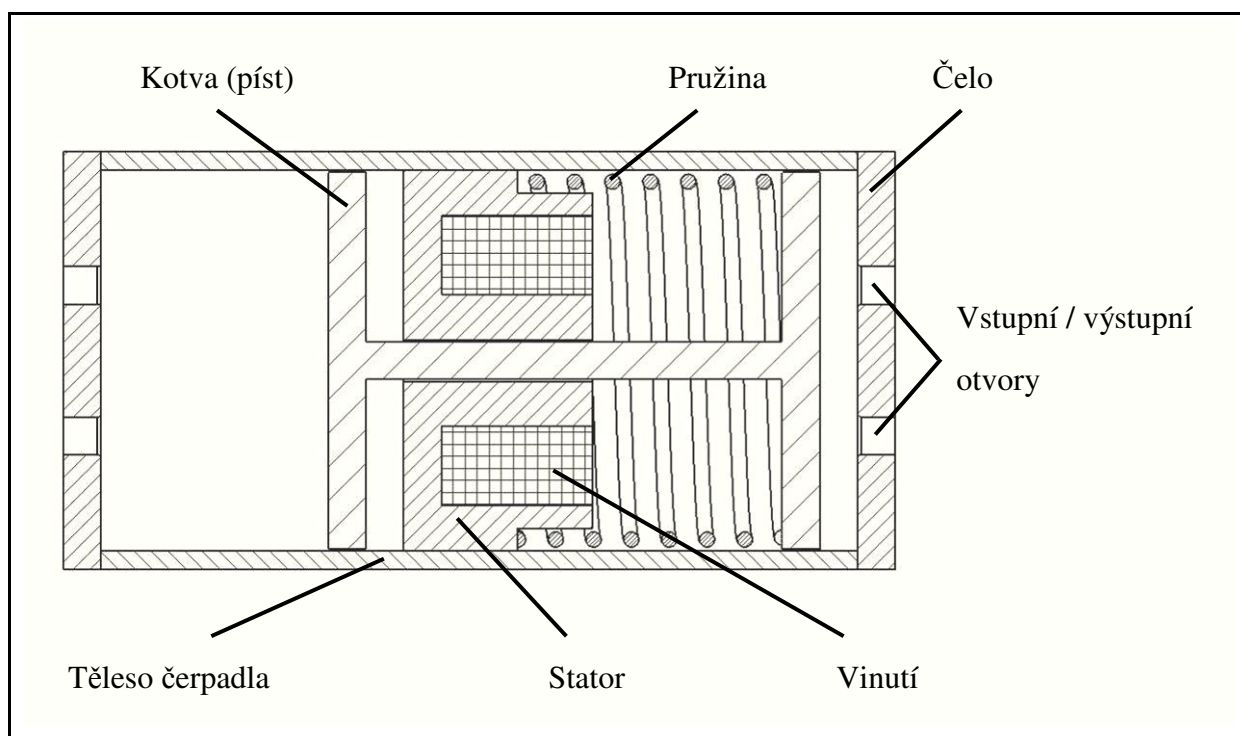
4.2. Návrh konstrukce 2

Druhý návrh konstrukce lineárního oscilačního pohonu (viz Obr. 34) se skládá z tělesa, ve kterém je umístěn stator s vinutím, dále jsou zde dva písty. Písty jsou vzájemně propojeny pomocí spojovací tyče, která prochází středem statoru. Pohon by měl fungovat tak, že po přivedení napětí na jedno vinutí toto vinutí k sobě přitáhne kotvu (píst), čímž na této straně nasaje tekutinu do komory a druhý píst na opačné straně vytlačí tekutinu z komory, poté dojde k odpojení prvního vinutí a zapnutí druhého vinutí a celý proces se opakuje, přičemž píst se pohybuje opačným směrem.

Další variantou tohoto návrhu je návrh konstrukce lineárního oscilačního pohonu podle Obr. 35, kde bylo nahrazeno jedno vinutí vratnou pružinou, celkově by tak došlo ke zkrácení délky pohonu.



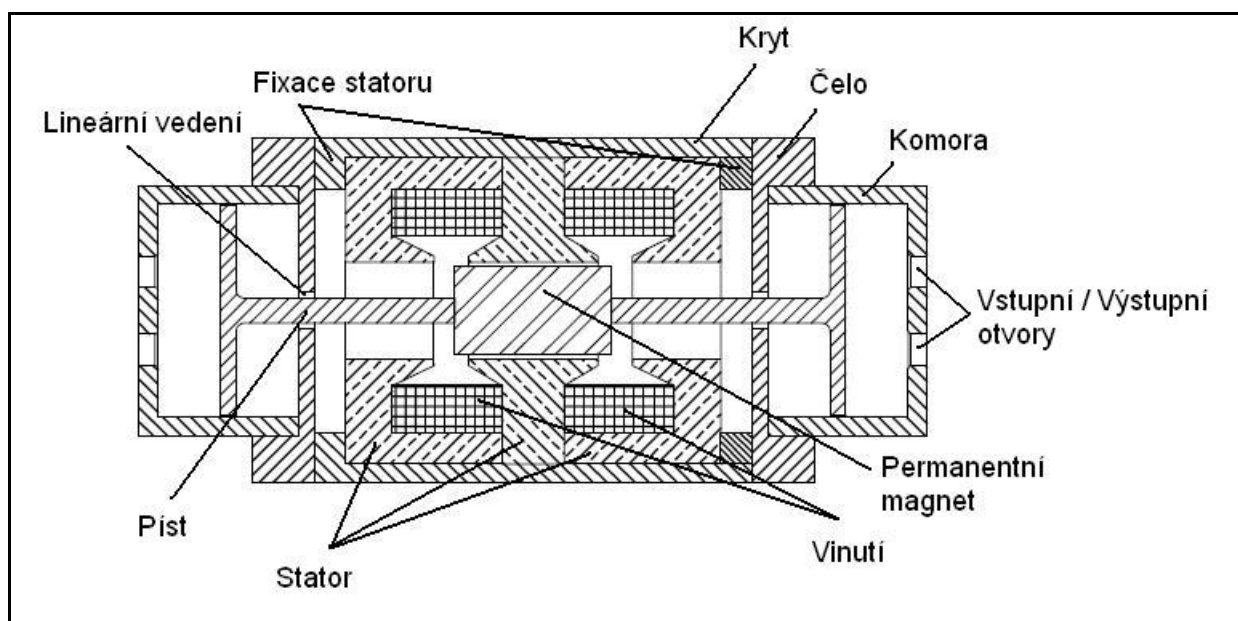
Obr. 34: Lineární oscilační pohon – návrh 2



Obr. 35: Lineární oscilační pohon – úprava návrhu 2

4.3.Návrh konstrukce 3

Poslední návrh (viz Obr. 36) vychází z patentu popsaného v kapitole 2.4.8. V tomto případě je součástí konstrukce pouze jeden permanentní magnet pohybující se ve statoru. Stator je složen z plechů a v jeho drážkách jsou navinuta prstencová vinutí. Celek statoru je nasunut v krytu a je z obou stran fixován přídržnými prstenci, na jedné straně pevným prstencem, který je součástí krytu. Na druhé straně je vložen volný prstenec, který zafixuje stator po dotažení čela. Kryt je z obou stran uzavřen čely, ve kterých je prostor pro uchycení čerpadlových komor, také v nich může být zakomponováno lineární vedení pístů, bude-li to potřeba. K permanentnímu magnetu jsou připojeny písty, které se pohybují v komorách, kde dochází k nasávání / vytlačování tekutiny. Dále by mohly být součástí konstrukce vratné pružiny pístů umístěné tak, aby se nedostaly do styku s čerpanou tekutinou. Tento návrh umožňuje použití pohonu nejen jako čerpadlo. Pokud se demontují komory, lze místo pístů k permanentnímu magnetu připojit pro konkrétní účely jiné zařízení.



Obr. 36: Lineární oscilační pohon – návrh 4

4.4. Parametry pohonu

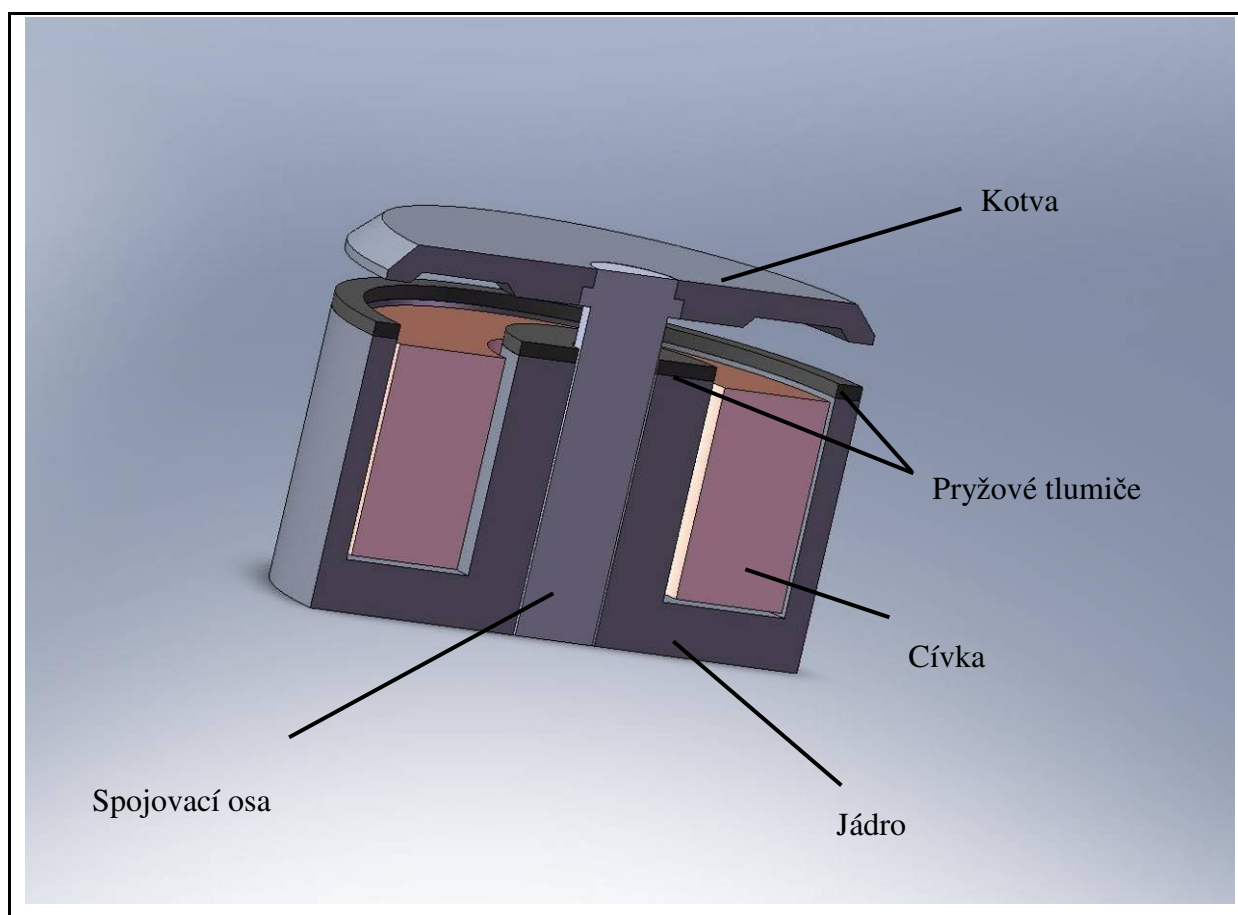
Vzhledem k tomu, že nejsou známy parametry zátěže, tedy nevíme nic o tom, s jakou zátěží bude tento pohon pracovat, budeme se proto zabývat návrhem univerzálního oscilačního lineárního pohonu, který by splňoval podmínku výkonu $1 - 5 \text{ W}$. Při návrhu budeme vycházet z kap. 4.2 podle Obr. 34. Budeme se držet jednoduché koncepce elektromagnetu s válcovou symetrií, jednak proto, že symetrické těleso lze snadněji modelovat, a také proto aby bylo možno jej lehce zařadit do systému kde by mohl pracovat jako pohon čerpadla. Nicméně to neznamená, že je tento stroj nutně určen pouze pro pohon čerpadla, pokud bude potřeba, lze jej použít i v jiných aplikacích, pro pohon různých mechanismů, které budou respektovat fyzikální vlastnosti uvedeného pohonu. Hlavním přínosem využití elektromagnetu, jako pohonu by měla být skutečnost, že lze vytvořit jednoduchý, kompaktní celek, s minimem součástí, což by mohlo být přínosné zejména z hlediska spolehlivosti a celkové mechanické nenáročnosti zařízení.

Rozhodli jsme se, že použijeme koncepci, kdy elektromagnet bude provozován v impulsním režimu, která se pro tento typ pohonu jeví celkem vhodná. To znamená, že po určité krátké době periody bude pohon na přemísťované břemeno působit velkým impulsem síly na krátké dráze a do konečné polohy by se mělo dostat vlastní setrvačností. Snahou bude dosažení maximálního proudu v co nejkratším časovém úseku. Z tohoto důvodu by se dalo přistoupit ke zkrácení amplitudy kmitavého pohybu. Toto řešení by také mohlo být výhodnější z energetického hlediska než kdyby pohon působil na zátěž po celou dopravní dráhu. Cívka elektromagnetu by tak mohla být přetěžována vyšší proudovou hustotou po kratší dobu. Navrhovaný pohon by mohl sloužit například k pohonu čerpadla, ovšem tento konkrétně uváděný návrh se zabývá pouze mechanickými a elektrickými výpočty pohonu a nezabývá se mechanickými výpočty týkajícími se čerpadla ani čerpaných tekutin.

5. SIMULAČNÍ MODEL LINEÁRNÍHO POHONU

5.1. Geometrický model

Při návrhu modelu bylo použito prostředí konstrukčního CAD softwaru Solidworks. Model pohonu sestává z několika součástí, jak si lze všimnout na Obr. 37. Jedná se o jádro, pohyblivý píst - kotva, cívku vinutí, spojovací osu a pryžové tlumičí kroužky. Cívka vinutí je vložena v jádře, jehož středem prochází spojovací osa, se kterou je spojena kotva. Aby při přitažení kotvy k jádru mezi nimi nedocházelo k tvrdému kontaktu, jsou k tomuto účelu na horní straně jádra přilepeny pryžové tlumiče, jeden na vnitřním průměru jádra a druhý na vnějším průměru.



Obr. 37 : Poloviční model pohonu v řezu

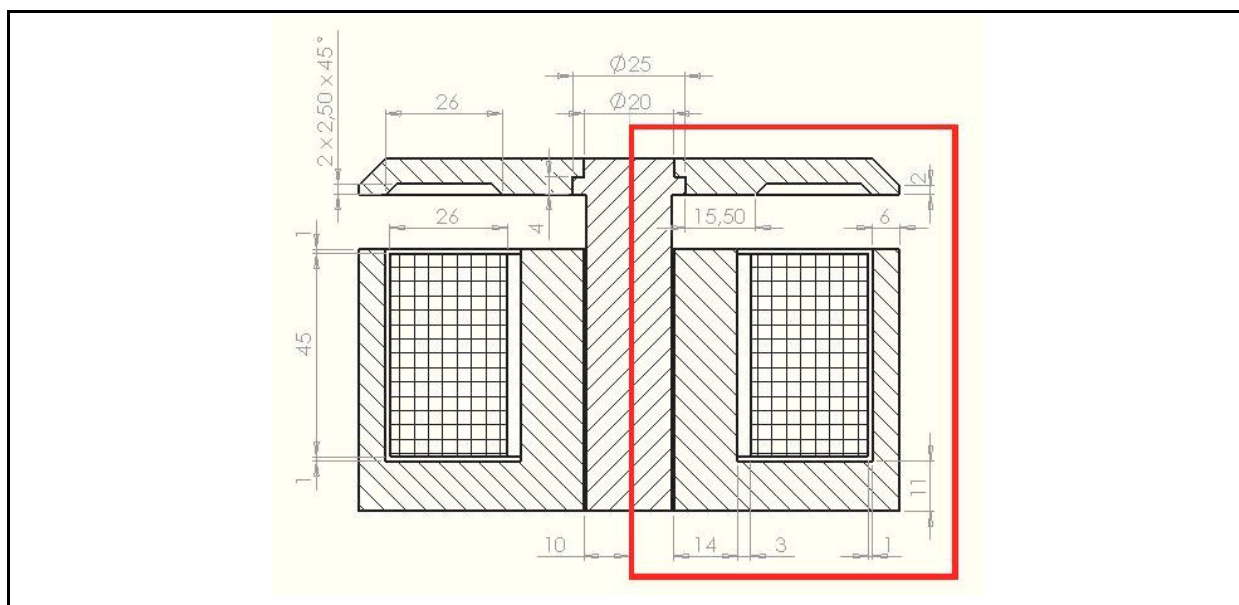
5.2.MKP model lineárního pohonu

Před vlastním MKP modelováním pohonu bylo možno vybrat ze dvou možností, jak model navrhovaného pohonu vytvořit.

Jednou možností bylo využít modelovací prostředí Ansys Workbench, které poskytuje relativně snadnou možnost 3D modelování a provádění MKP analýzy, dá se říct, že toto prostředí je více přijatelné pro širší spektrum uživatelů, jelikož modelování a zadávání okrajových podmínek je zde více intuitivní a přehledné.

Druhou možností bylo využití přímo prostředí Ansys, které se zpočátku jeví uživatelsky složitější a méně intuitivní. Ovšem celkově je jednodušší pro modelování opakujících se úloh. Poskytuje snadnou možnost modelování v cyklech, prostřednictvím maker, tvořených textovými instrukcemi a následně, pokud je potřeba daný model optimalizovat je jednodušší upravování modelu a opětovné provádění výpočtů. Pro návrh parametrů oscilačního lineárního pohonu v této práci bylo využito simulační prostředí MKP software ANSYS.

Na Obr. 38 je v červeném obdélníku zvýrazněna část pohonu, která byla modelována, díky využití podmínky osové symetrie stačilo vytvořit a nasimulovat polovinu modelu. Rozměry modelu byly voleny s ohledem na dosažení maximální síly pro danou geometrii s konkrétní hmotností. Na počátku bylo stanoveno, že minimální požadovaná výstupní síla na kotvu bude 10 N.



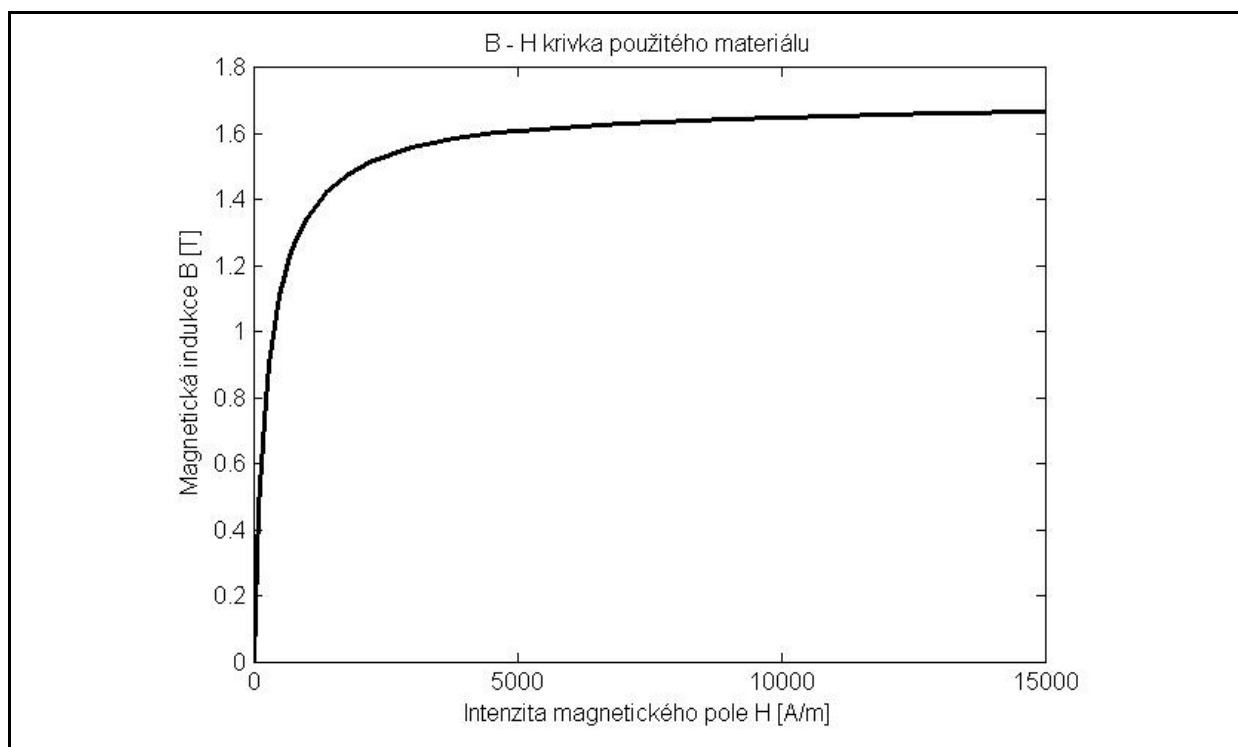
Obr. 38: Geometrický model pohonu s naznačenou částí modelovanou v prostředí Ansys

Samotný model se připraví v Preprocesoru, kde se definují jednotlivé parametry a zadávají číselné hodnoty.

Nejprve je potřeba nadefinovat typ prvku, provedeme výběrem **Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**. Jelikož se zde zabýváme elektromagnetickou úlohou, máme na výběr ze třech prvků, dva pro 2D úlohu a jeden pro 3D úlohu. Jelikož řešíme 2D problém, výběr se zúží na dva prvky čtyřuzlový „PLANE13“ nebo osmiuzlový „PLANE53“, jelikož řešíme osově symetrickou úlohu, zvolíme prvek „PLANE53“. Podrobnosti o prvcích lze nalézt v [25]. Zároveň je třeba na začátku modelování definovat, že se jedná o osově symetrickou úlohu, potom stačí namodelovat polovinu modelu a výpočetní systém si již zbytek dopočítá sám. Provedeme výběrem **Main Menu > Preprocessor > Element Type > Options > Element behavior (Axisymmetric)**.

Dále přes příkazový řádek vkládáme jednotlivé proměnné, které později využijeme pro definování, rozměrů, hodnoty proudové hustoty a velikosti prvku.

V dalším kroku se definují materiálové vlastnosti všech použitých materiálů. To se provede výběrem **Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > Electromagnetics**.



Obr. 39 : B – H křivka použitého materiálu

V tomto modelu, bylo potřeba definovat vlastnosti čtyřech použitých materiálů, vzduchu, železa 1, železa 2 a cívky. V případě vzduchu a cívky se zadává relativní permeabilita materiálu, která je konstantní, vybere se v sekci **Electromagnetics > Relative Permeability > Constant > MURX**. Pro vzduchu i cívku je relativní permeabilita stejná, rovna 1. V případě železa byla situace složitější, protože nemá konstantní permeabilitu je potřeba definovat BH křivku (viz Obr. 39). To se provede výběrem **Electromagnetics > BH curve**, kde se vypíší jednotlivé body křivky.

Následně se vytvoří geometrie samotného modelu. K vytvoření 2D modelu, použijeme příkaz „rectng“ **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By dimensions**, pro obdélník a „arbitrary“ **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs**, pro vytvoření obecné plochy definováním úseček mezi jednotlivými keypointy. Dále příkazem „aovlap“ **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap > Areas** se navzájem oddělí všechny vytvořené plochy, potom příkazem „pnum“, který lze najít v **Utility menu** pod tlačítkem **PloCtrls > Numbering > Area numbers** se jednotlivé plochy očíslovají, tak aby bylo možno později přiřadit materiálové vlastnosti konkrétním plochám.

Když máme hotovou základní geometrii a nadefinovány materiály, tak lze přistoupit k přiřazení materiálových vlastností konkrétním plochám. V **Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool > Element Attributes > Areas > Set**, dojde k otevření nového panelu, poté co vybereme jednotlivé plochy jednoho konkrétního materiálu klikneme na **Ok** a otevře se nám další panel, kde v záložce **Material number** vybereme požadovaný materiál, poté klikneme na **Apply** a provedeme tentýž postup pro všechny čtyři materiály, na závěr místo **Apply** klikneme na **Ok**.

V další fázi se nastaví parametry sítě, je třeba volit síť dostatečně hustou, aby byla zaručena dobrá konvergence výsledků, ale zároveň ne příliš hustá, aby nedocházelo k zdlouhavému výpočtu, který by byl zbytečně časově náročný, přičemž z hlediska přesnosti výsledků by neměl žádný smysl. Nastavení velikosti prvku se provede **Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool > Size Control > Global > Set > Element edge length**, otevře se nový panel, kde se zadá požadovaná velikost prvku, v tomto modelu byla zvolena velikost prvku 0,5 mm. Klikem na **Ok** se panel zavře. Nyní lze vygenerovat síť v panelu **MeshTool > Mesh > Areas > Mesh**. Po vygenerování sítě se panel **MeshTool** zavře tlačítkem **Close**.

Pokud se zdárně podařily všechny předchozí kroky, lze přistoupit k poslední fázi modelování v preprocesoru a tou je zadávání okrajových podmínek. Vzhledem k tomu, že se řeší elektromagnetická úloha, je třeba nastavit podmínku „flux par‘l“, která stanoví, kde jsou hra-

nice modelu, za které se již žádný magnetický tok nedostane. Nejdříve si vykreslíme úsečky pomocí **Utility Menu > Plot > Lines** a potom v **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Magnetic > Boundary > Vector Poten > Flux Par'l > On Lines** dojde k otevření nového panelu. Poté co vybereme jednotlivé úsečky na hranicích modelu, klikneme na **Ok** v tomto panelu. Dále je třeba zadat proudovou hustotu na plochu cívky, provedeme výběrem **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Magnetic > Excitation > Curr Density > On Areas**, poklikem vybereme plochu cívky, poté kliknutím na **Ok** zavřeme panel.

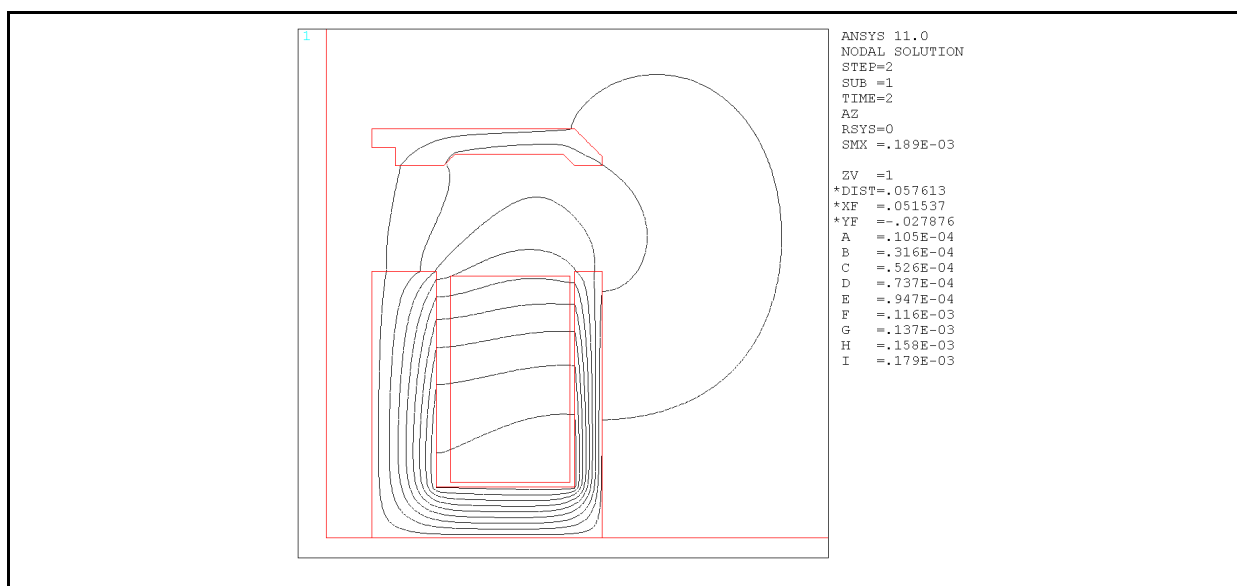
Na závěr přípravy modelu v preprocesoru je třeba ještě vytvořit komponentu, na které budeme zjišťovat výslednou sílu a přiřadit ji okrajové podmínky, tak aby po ukončení výpočtů bylo možné zjistit velikost magnetické síly, která na ni působí. Zjištění magnetické síly působící na komponentu je hlavní důvod, proč se provádí MKP modelování. Pro tento účel si vybereme materiál, ze kterého je budoucí komponenta vytvořena kliknutím na **Utility Menu > Select > Entities**, v novém vyskočivším panelu zvolíme v první rozbalovací záložce **Elements**, v druhé rozbalovací záložce zvolíme **By Attributes**, dále v okénku **Min, Max, Inc** zadáme číslo materiálu komponenty, v našem případě to bylo 3, nakonec potvrdíme volbu kliknutím na **Ok**. Poté vykreslíme prvky komponenty kliknutím na **Utility Menu > Plot > Elements**, dále pojmenujeme komponentu, v **Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component**, v záložce **Component name** napíšeme název komponenty, v našem případě Železo, dále v záložce **Component is made of** vybereme možnost **Elements** a volbu potvrdíme kliknutím na **Ok**.

V tuto chvíli by měl být náš model kompletně nadefinován a tak lze přistoupit k samotnému řešení „solution“. Řešení spustíme v **Main Menu > Solution > Solve > Electromagnet > Static Analysis > Opt & Solve** a potvrzením **Ok**.

V případě, že všechny předchozí kroky byly provedeny správně a řešení proběhlo úspěšně, lze si zobrazit výslednou sílu **Main Menu > General Postproc > Elec & Mag Calc > Component Based > Force**, poklikem na **Component name(s) - Železo** a **Ok** vyskočí okno s číselnou hodnotou výsledné síly. Další možností zobrazení výsledků je vykreslení průběhu siločar v modelu, provedeme příkazem **Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > 2D Flux Lines > Ok**. Zobrazené siločáry v modelu lze vidět na Obr. 40 a na Obr. 42. Nakonec si ještě zobrazíme hustotu magnetického toku **Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu > Magnetic Flux Density > Magnetic flux density vector sum > Ok**. Zobrazené výsledky hustoty magnetického toku lze vidět na Obr. 41 a na Obr. 43.

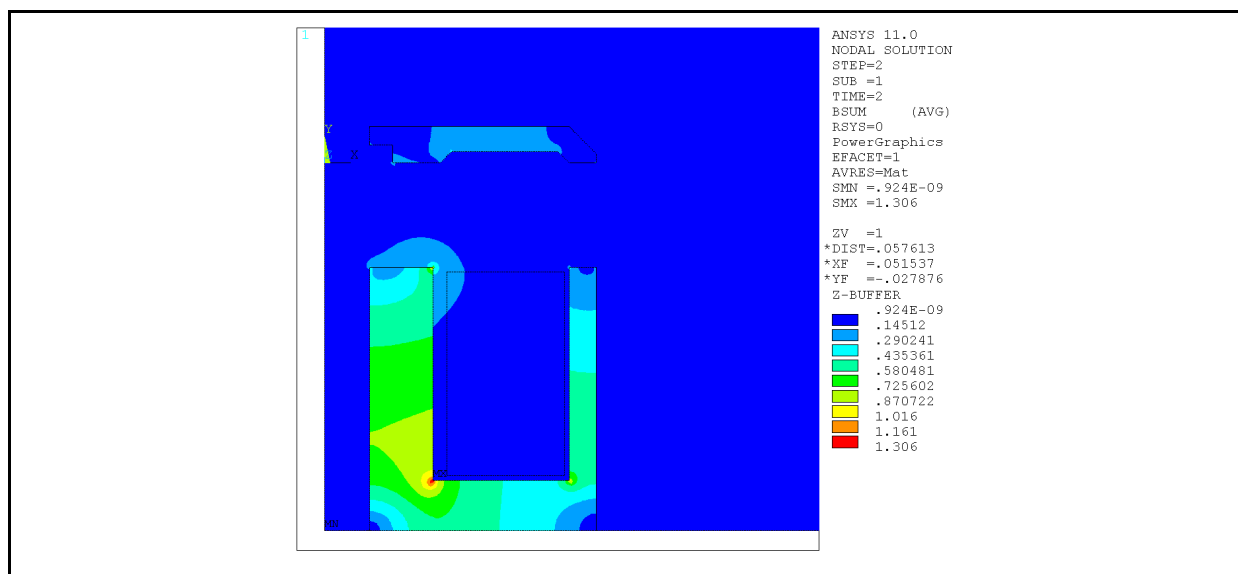
5.3. Výsledky simulačního MKP modelování

Na Obr. 40 je znázorněn průběh siločar v modelu pohonu. Je vidět, že když bude kotva v poloze 0 mm, to je nejdále od jádra s cívkou, vzduchová mezera mezi kotvou a jádrem bude 20 mm, tak se většina siločar uzavírá přes jádro a cívku a jen minimum projde přes vzduchovou mezeru a uzavře se přes kotvu. Průběh na Obr. 40 je pro hodnotu proudové hustoty $2,5 \text{ A/m}^2$.



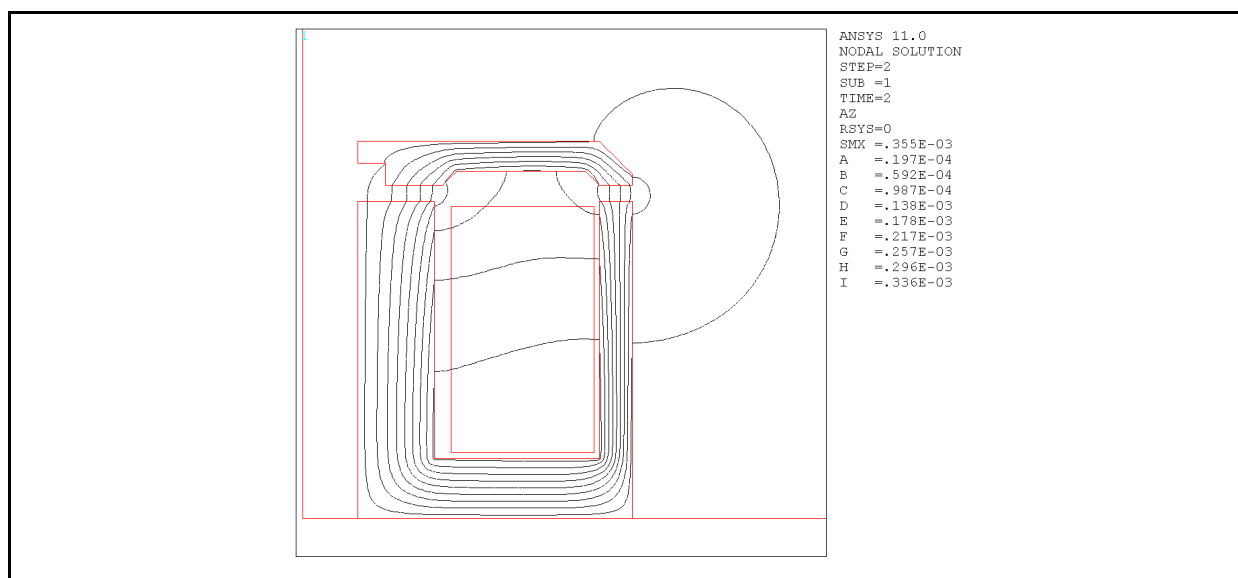
Obr. 40 : Průběh siločar v poloze kotvy 0 mm

Na Obr. 41 je rozložení magnetického indukčního toku v modelu v poloze kotvy 0 mm a pro hodnotu proudové hustoty $2,5 \text{ A/m}^2$. Jak je vidět, tak hodnota magnetické indukce v železné kotvě dosahuje hodnot okolo 0,3 T. V železném jádře cívky je hodnota magnetické indukce přibližně 0,7 T.



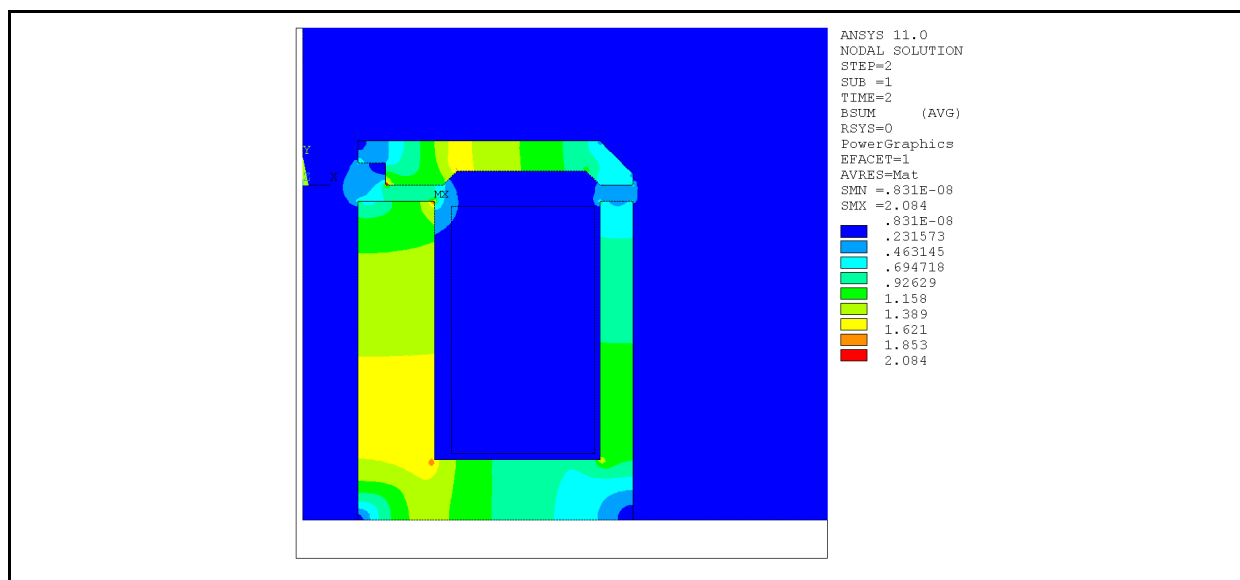
Obr. 41: Hustota magnetického indukčního toku v poloze kotvy 0 mm

Na Obr. 42 je vidět průběh siločar v poloze kotvy 20 mm. Jak je patrné, tak většina siločar prochází jádrem cívky, přes vzduchovou mezeru vstupuje do kotvy a přes druhou vzduchovou mezeru se uzavírá zpět do jádra cívky.



Obr. 42: Průběh siločar v poloze kotvy 20 mm

Na Obr. 43 je vidět rozložení magnetického indukčního toku v poloze kotvy 20 mm, tj. nejbližší k jádru cívky. Magnetická indukce v jádře cívky dosahuje přibližné hodnoty 1,4 T a v kotvě dosahuje přibližně hodnoty 1,1 T.



Obr. 43 : Hustota magnetického toku v poloze kotvy 20 mm

5.3.1. Tabulka výsledků

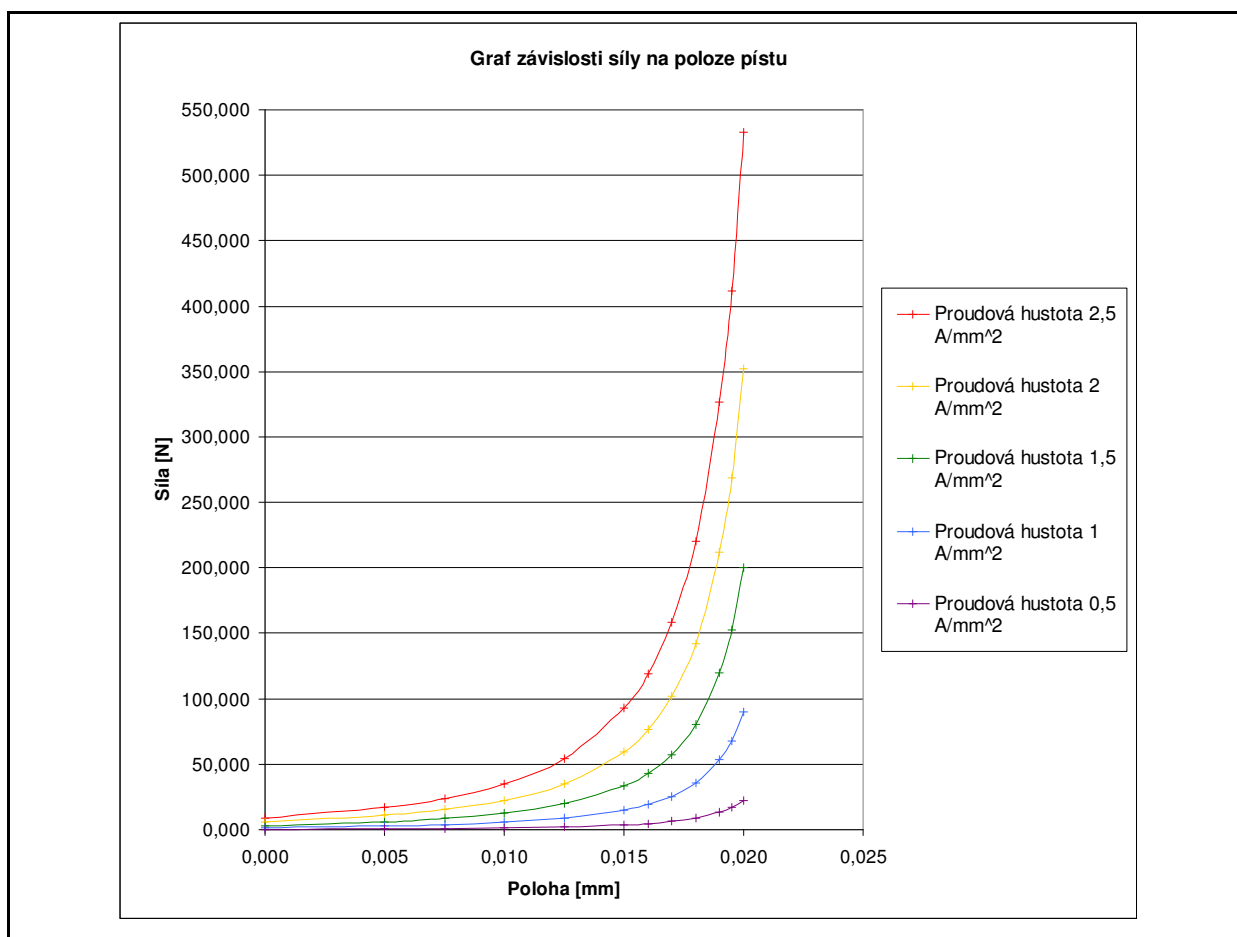
Vzdálenost [m]	Proudová hustota [A/mm^2]	Suma sil [N]	B [T]
0	0,50	0,365	0,14
0,005	0,50	0,680	0,15
0,0075	0,50	0,963	0,16
0,01	0,50	1,415	0,17
0,0125	0,50	2,199	0,18
0,015	0,50	3,741	0,19
0,016	0,50	4,813	0,21
0,017	0,50	6,409	0,23
0,018	0,50	8,948	0,25
0,019	0,50	13,407	0,28
0,0195	0,50	17,056	0,30
0,02	0,50	22,516	0,32

Vzdálenost [m]	Proudová hustota [A/mm ²]	Suma sil [N]	B [T]
0	1,00	1,458	0,31
0,005	1,00	2,720	0,32
0,0075	1,00	3,849	0,33
0,01	1,00	5,658	0,34
0,0125	1,00	8,790	0,36
0,015	1,00	14,950	0,38
0,016	1,00	19,233	0,40
0,017	1,00	25,603	0,42
0,018	1,00	35,734	0,45
0,019	1,00	53,509	0,51
0,0195	1,00	68,036	0,58
0,02	1,00	89,738	0,66
0	1,50	3,280	0,43
0,005	1,50	6,115	0,44
0,0075	1,50	8,655	0,46
0,01	1,50	12,720	0,46
0,0125	1,50	19,758	0,51
0,015	1,50	33,593	0,57
0,016	1,50	43,208	0,62
0,017	1,50	57,494	0,64
0,018	1,50	80,192	0,67
0,019	1,50	119,930	0,74
0,0195	1,50	152,320	0,80
0,02	1,50	200,550	0,87
0	2,00	5,826	0,57
0,005	2,00	10,862	0,59
0,0075	2,00	15,373	0,61
0,01	2,00	22,588	0,63
0,0125	2,00	35,077	0,67
0,015	2,00	59,603	0,76
0,016	2,00	76,631	0,78
0,017	2,00	101,900	0,84
0,018	2,00	141,970	0,92
0,019	2,00	211,860	1,00
0,0195	2,00	268,470	1,14
0,02	2,00	351,920	1,22
0	2,50	9,094	0,72
0,005	2,50	16,952	0,74
0,0075	2,50	23,988	0,76
0,01	2,50	35,239	0,78
0,0125	2,50	54,700	0,86
0,015	2,50	92,869	0,93
0,016	2,50	119,320	0,97
0,017	2,50	158,500	1,07
0,018	2,50	220,330	1,16
0,019	2,50	327,010	1,24
0,0195	2,50	411,790	1,33
0,02	2,50	532,970	1,35

Tab. 1: Tabulka výsledků pro model pohonu

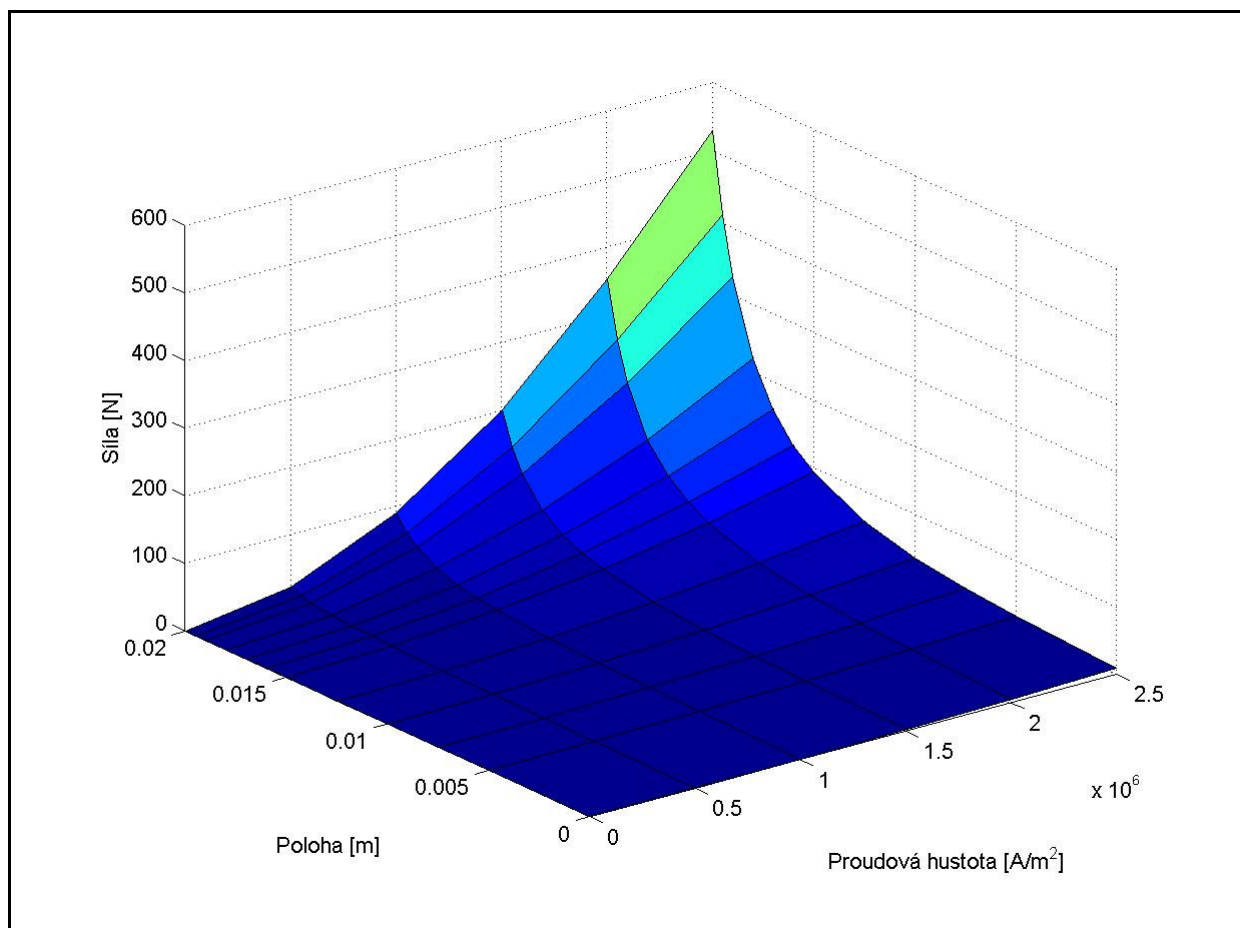
Tab. 1 ukazuje hodnoty získané simulačním modelováním. Simulace byly provedeny pro několik proudových hustot cívky od $0,5 \text{ A/mm}^2$ do $2,5 \text{ A/mm}^2$. Pro jednotlivé polohy kotvy od 0 mm do 20 mm byla zjišťována výsledná síla působící na kotvu. Simulované hodnoty polohy byly stanoveny odhadem, tak aby výsledné hodnoty sil po vynesení do grafu vytvořily přibližně hladkou křivku. Dále byla v jednotlivých polohách kotvy zjišťována též hodnota magnetické indukce v železném jádře cívky. Hodnota magnetické indukce bude dále použita pro výpočet indukčnosti cívky.

Na Obr. 44 je vidět graf závislosti síly na poloze kotvy vytvořený z hodnot simulačního modelování. Z grafu je patrné, že největší hodnoty síly bylo dosaženo, když byla kotva v poloze 20 mm a proudová hustota v cívce byla $2,5 \text{ A/mm}^2$. Dále si lze všimnout, že s rostoucí proudovou hustotou a zmenšující se vzduchovou mezerou výrazně roste i výsledná síla.



Obr. 44: Graf závislosti síly na poloze pístu

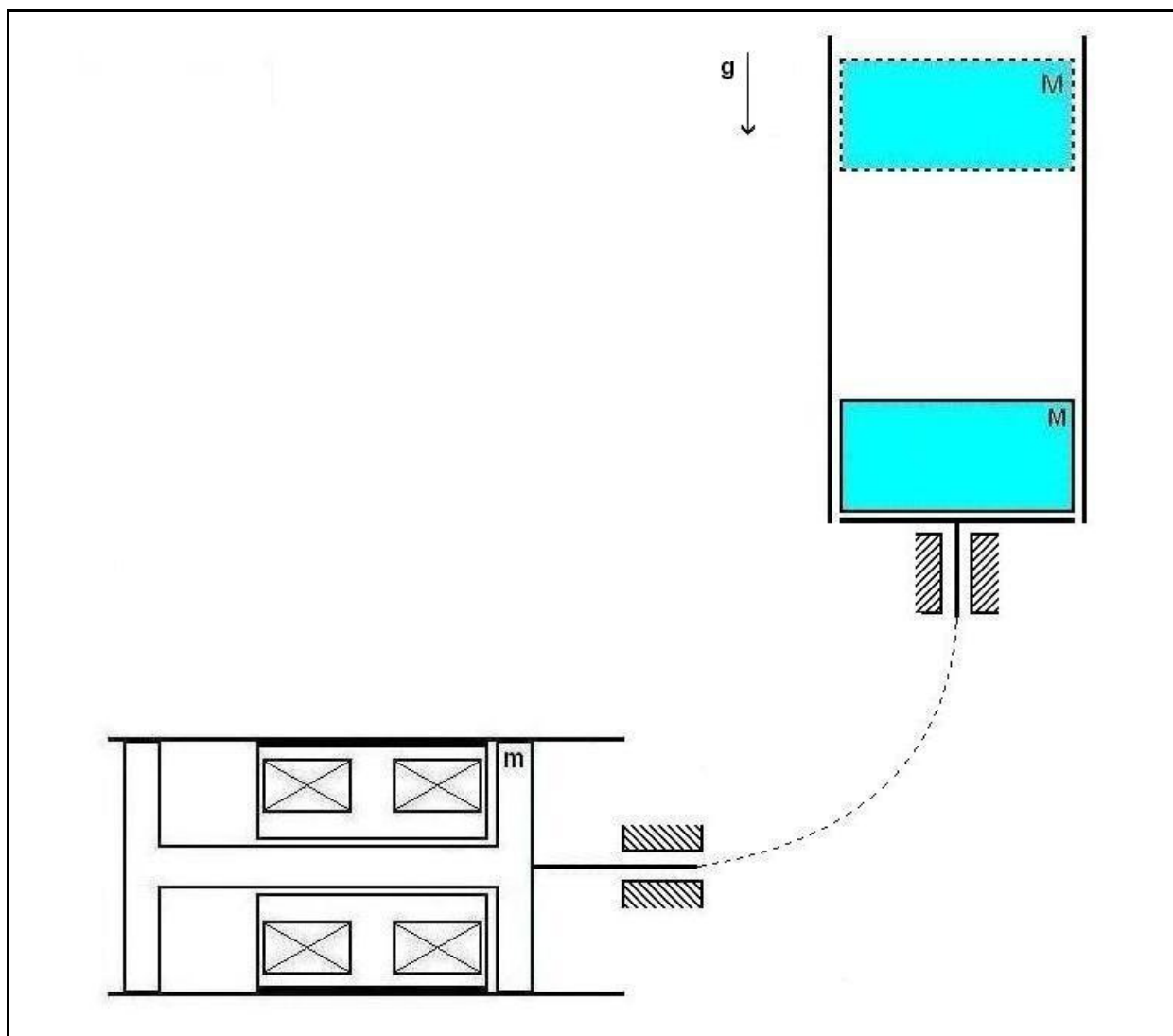
Na Obr. 45 jsou v trojrozměrném grafu znázorněny výsledky zjištěných hodnot síly F_m v závislosti na proudové hustotě a na poloze kotvy. Z grafu je patrné, že síla F_m je přímo úměrná proudové hustotě, takže s rostoucí proudovou hustotou roste i síla a je přímo úměrná poloze kotvy, takže s rostoucí vzduchovou mezerou se síla zmenšuje.



Obr. 45: Graf závislosti síly F_m na proudové hustotě J a poloze pístu x

V grafu na Obr. 45 je vidět, že síla F_m je maximální v maximální poloze 20 mm. Což je v rozporu se skutečností, že síla je nepřímo úměrná velikosti vzduchové mezery. Tento rozpor je však způsoben tím, že při návrhu pohonu bylo stanoveno, že poloha kotvy bude 0 mm, když velikost vzduchové mezery bude maximální, tedy 20 mm. Při pohybu kotvy bude hodnota polohy růst od 0 mm do 20 mm, přitom se bude velikost vzduchové mezery zmenšovat z hodnoty 20 mm na hodnotu 0 mm. Potom i hodnoty síly F_m v grafu odpovídají správné poloze kotvy a velikosti vzduchové mezery.

6. SILOVÉ POMĚRY POHONU



Obr. 46: Soustava pohonu

Vzhledem k tomu, že koncipujeme pouze pohon a o břemenu nic nevíme, tak zavedeme zjednodušující předpoklad, že tření působí pouze v pohonu a na břemeno působí pouze tíhová síla. Pro další úvahy provedeme uvolnění těles a formulaci pohybových rovnic. Při formulaci pohybových rovnic vycházíme z newtonových pohybových zákonů. Obecnou formulaci druhého newtonova zákona vyjadřuje následující rovnice

$$m\ddot{x} = \sum F \quad (1)$$

kde m je hmotnost tělesa, \ddot{x} je zrychlení tělesa a $\sum F$ je suma všech vnějších sil, působících na těleso.

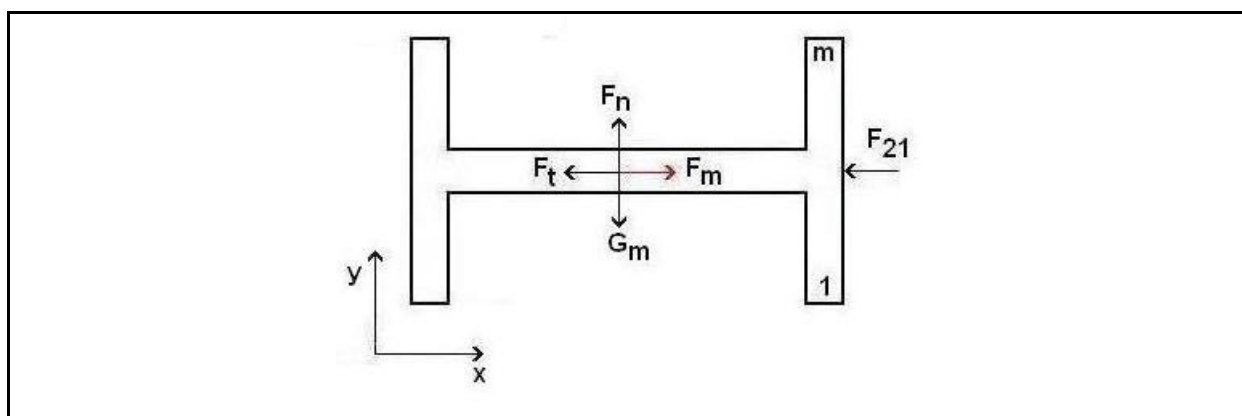
Prvním tělesem v soustavě je kotva (viz Obr. 47). V ose x na kotvu působí elektromagnet silou F_m , je to síla kterou vytvoří cívka navinutá na jádře, při konkrétní hodnotě budícího proudu, respektive proudové hustoty a pro konkrétní polohu kotvy elektromagnetu. Je tedy zřejmé že síla elektromagnetu F_m je závislá na poloze a proudu, $F_m = f(x, i)$. Je to jediná síla v navrženém pohonu, která koná užitečnou práci. Dále na kotvu působí síla F_{21} od břemena, tato síla má směr proti magnetické síle F_m . Další silou, působící na kotvu, je tečná síla F_t , tato síla působí vždy, pokud existuje nějaká jiná síla, která má snahu pohnout s kotvou a bude působit vždy proti jejímu pohybu. V ose y působí na těleso normálová síla F_n a tíhová síla G_m , $G_m = m \cdot g$, kde m je hmotnost kotvy, g je tíhové zrychlení.

$$m\ddot{x} = F_m - F_t - F_{21} \quad (2)$$

$$m\ddot{x} - F_m + F_t = -F_{21}$$

$$m\ddot{y} = F_n - G_m \quad (3)$$

$$F_n = G_m = m \cdot g$$



Obr. 47: Uvolnění kotvy

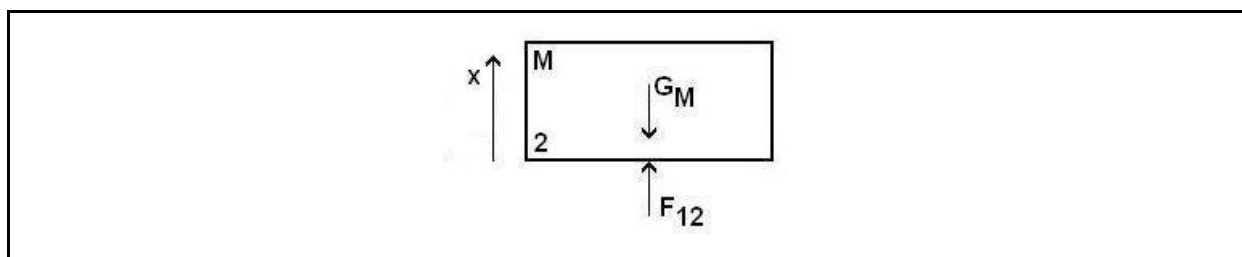
Další těleso v soustavě je břemeno (viz Obr. 48). Na břemeno působí tíhová síla G_M , v případě, že uvažujeme pouze pohyb vzhůru, ve vertikálním směru, bude tato síla působit

proti pohybu tělesa, bude mu udělovat záporné zrychlení, takže bude brzdit jeho pohyb. Také koná zápornou, neužitečnou práci. Na břemeno dále působí síla F_{12} od kotvy, která směřuje proti tíhové síle G_M .

$$M\ddot{x} = -G_M + F_{12} \quad (4)$$

$$M\ddot{x} + G_M = F_{12}$$

Je třeba zdůraznit, že v navrženém modelu pohonu, nepočítáme s tím, že by se zdvíhané břemeno pohybovalo zpět, tzn. že pokud při svém pohybu dosáhne určité polohy, kde se zastaví, zůstane v této poloze a již se nepohybuje zpět. Sílu G_M lze rozepsat, jako $g \cdot M$, kde M je hmotnost břemene.



Obr. 48: Uvolnění břemene

Vzhledem k tomu, že síly F_{12} a F_{21} jsou vzájemné síly akce a reakce, jsou stejně velké, ale opačně orientované.

$$F_{12} - F_{21} = 0 \quad (5)$$

Potom lze napsat

$$M\ddot{x} + G_M + m\ddot{x} - F_m + F_t = 0$$

$$(M + m) \cdot \ddot{x} = F_m - G_M - F_t \quad (6)$$

V uvedeném modelu lineárního pohonu lze zaznamenat tři případy vzájemného působení sil. V prvním případě je $F_m = 0 \text{ N}$, magnetická síla F_m na soustavu nepůsobí, na vinutí nebylo přivedeno napájecí napětí, to znamená, že kotva není přitahována a stojí, pak $F_t = -G_M$, tečná síla má stejnou velikost jako tíhová síla G_M , ale působí proti sobě.

Ve druhém případě $F_m \neq 0 \text{ N}$; $F_m < F_t$, na vinutí je připojeno napájecí napětí a síla F_m postupně narůstá, ovšem v tomto okamžiku ještě nedosáhla dostatečné velikosti, aby pohnula kotvou, potom $F_t = F_m - G_M$, součet magnetické síly F_m a tíhové síly G_M je roven tečné síle F_t . V určité chvíli růstu síly F_m nastane moment, kdy $F_m = G_M$, to znamená, že právě dosáhne velikosti tíhové síly G_M , potom tečná síla $F_t = 0 \text{ N}$. Po překonání tohoto okamžiku magnetická síla F_m stále roste, ale stále ještě nemá dostatečnou velikost, aby pohnula kotvou a mění se směr působení tečné síly F_t .

V posledním, třetím případě $F_m \neq 0 \text{ N}$ a již dosáhne dostatečné velikosti, aby pohnula kotvou, v tomto okamžiku se tečná síla F_t mění na třecí sílu F_T o konstantní velikosti $F_T = f \cdot F_n$, kde F_n je normálová síla a f je koeficient tření, mezi pohybující se kotvou a pevným vedením kotvy, pro tření ocel-ocel je tento koeficient roven 0,1. Potom upravíme dříve uvedenou rovnici (6)

$$(M + m) \cdot \ddot{x} = F_m - G_M - F_T, \quad (7)$$

Do rovnic (2) – (9) je dosazováno $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $m = 1,1 \text{ kg}$ a $M = 0,1 \text{ kg}$.

Nyní do upravené rovnice (7) dosadíme konkrétní hodnoty pro danou soustavu navrženého pohonu

$$(M + m) \cdot \ddot{x} = F_M - (m \cdot g \cdot f) - (g \cdot M) \quad (8)$$

Pro potřebu použití rovnice k vytvoření mechanického modelu soustavy pohonu v Simulinku vyjádříme výslednou rovnici (8) ve formě, kdy nejvyšší derivace je na levé straně a všechny ostatní proměnné jsou na straně pravé.

$$\ddot{x} = \frac{1}{(M + m)} (F_M - (m \cdot g \cdot f) - (g \cdot M)) \quad (9)$$

6.1. Dynamická simulace lineárního pohonu

Pro ověření fyzických vlastností modelu pohonu provedeme dynamickou simulaci. K této simulaci použijeme software Matlab a simulační prostředí Simulink.

Dynamická simulace probíhala v několika krocích, nejprve byla modelována a simulována mechanická část pohonu. Z pohybových rovnic byl vytvořen simulační mechanický model (viz Obr. 49). V další fázi bylo přikročeno k modelování a simulaci elektrické části pohonu (viz Obr. 53). Nakonec došlo k propojení mechanické a elektrické části pohonu do jediného mechatronického modelu (viz Obr. 56).

6.1.1. Mechanický model

Pro účely simulace mechanické části modelu využijeme dříve uvedenou rovnici (9), ze které budeme vycházet.

$$\ddot{x} = \frac{1}{(M + m)} (F_M - (m \cdot g \cdot f) - (g \cdot M))$$

Tato rovnice se ovšem v průběhu pohybu kotvy změní, to když kotva dojde na konec své dráhy, což je 20 mm, pak dojde k jejímu zastavení a dále už pokračuje v pohybu pouze břemeno, rovnice (9) potom bude mít následující tvar

$$\ddot{x} = \frac{-(g \cdot M)}{M} \tag{ 10 }$$

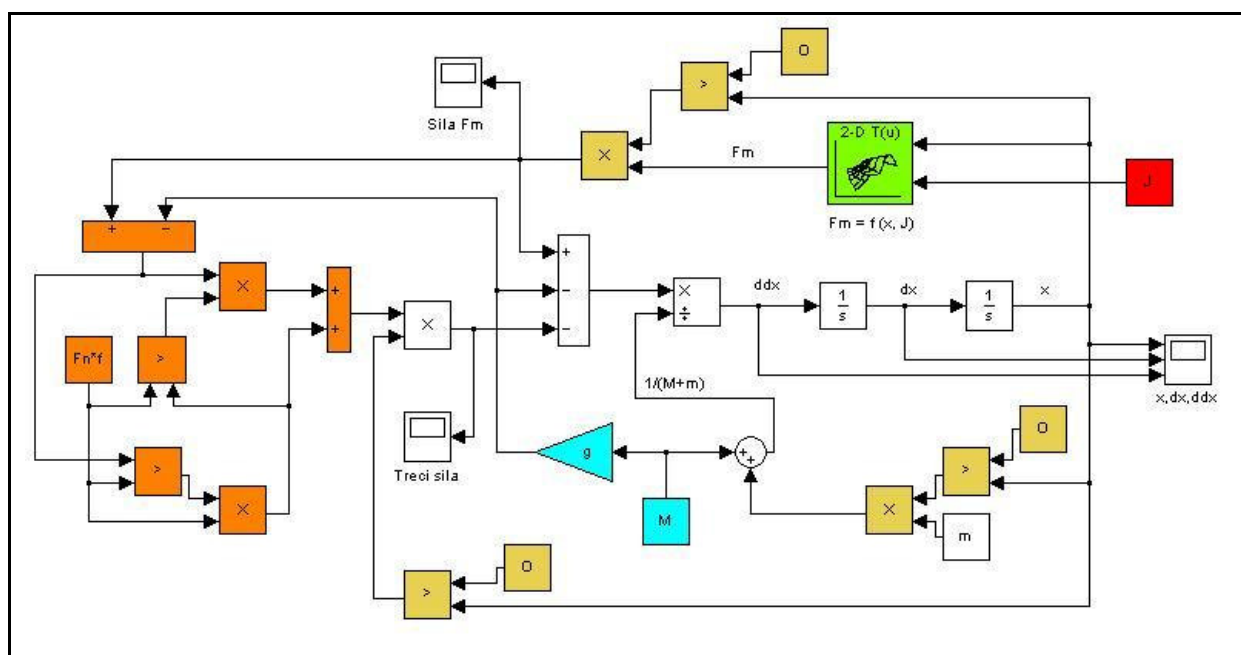
Jednou ze sil, působících v soustavě (viz Obr. 46) je magnetická síla elektromagnetu F_m , jejíž velikost pro jednotlivé polohy kotvy a pro jednotlivé proudové hustoty byly získány z modelu vytvořeného v Ansysu. Prostřednictvím bloku „LookUp Table“ (viz zelený blok v Obr. 49) vytvoříme trojrozměrnou charakteristiku průběhu magnetické síly F_m , tak aby odpo-

vídala výsledkům získaným z Ansysu. Abychom z modelu uvedeného na Obr. 49 získali výsledky, nahradíme proudovou hustotu konstantou (viz červený blok v Obr. 49).

Další silou je tečná (třecí) síla F_t , která působí na kotvu, když je v pohybu. Tečnou sílu F_t v modelu na Obr. 49 reprezentují oranžové bloky. A poslední silou působící v modelu je tíhová síla G_M , působící na břemeno, tuto sílu reprezentují modré bloky.

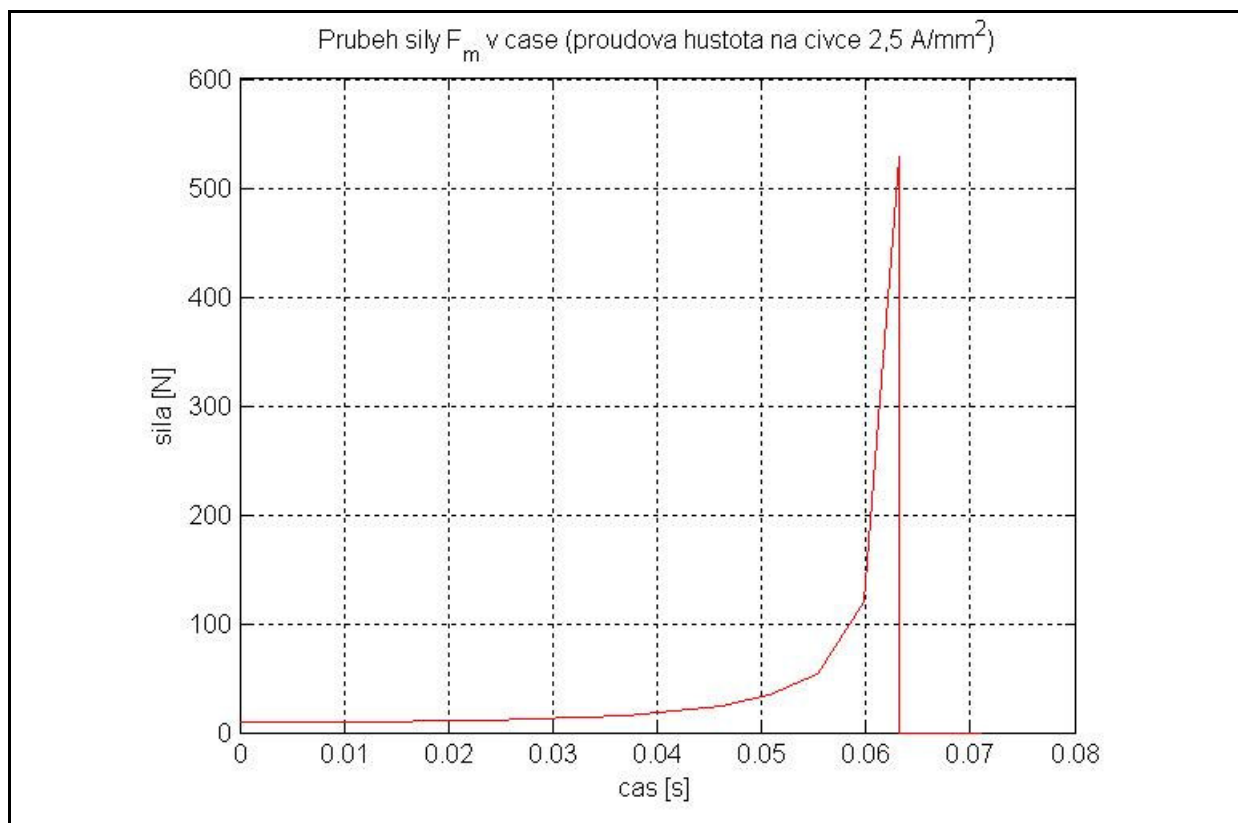
Mechanický model (viz Obr. 49) vychází z rovnice (9) a později po změně celkového sílového účinku na soustavu vychází z rovnice (10). V modelu je tento stav ošetřen pomocí konstant, které po dosažení polohy 20 mm nahradí příslušné síly v modelu nulovou hodnotou (viz žluté bloky v Obr. 49).

Model uvedený na Obr. 46 předpokládá, že pohon (kotva) bude pracovat ve vodorovné poloze a těleso se bude prostřednictvím flexibilního propojení pohybovat svisle.



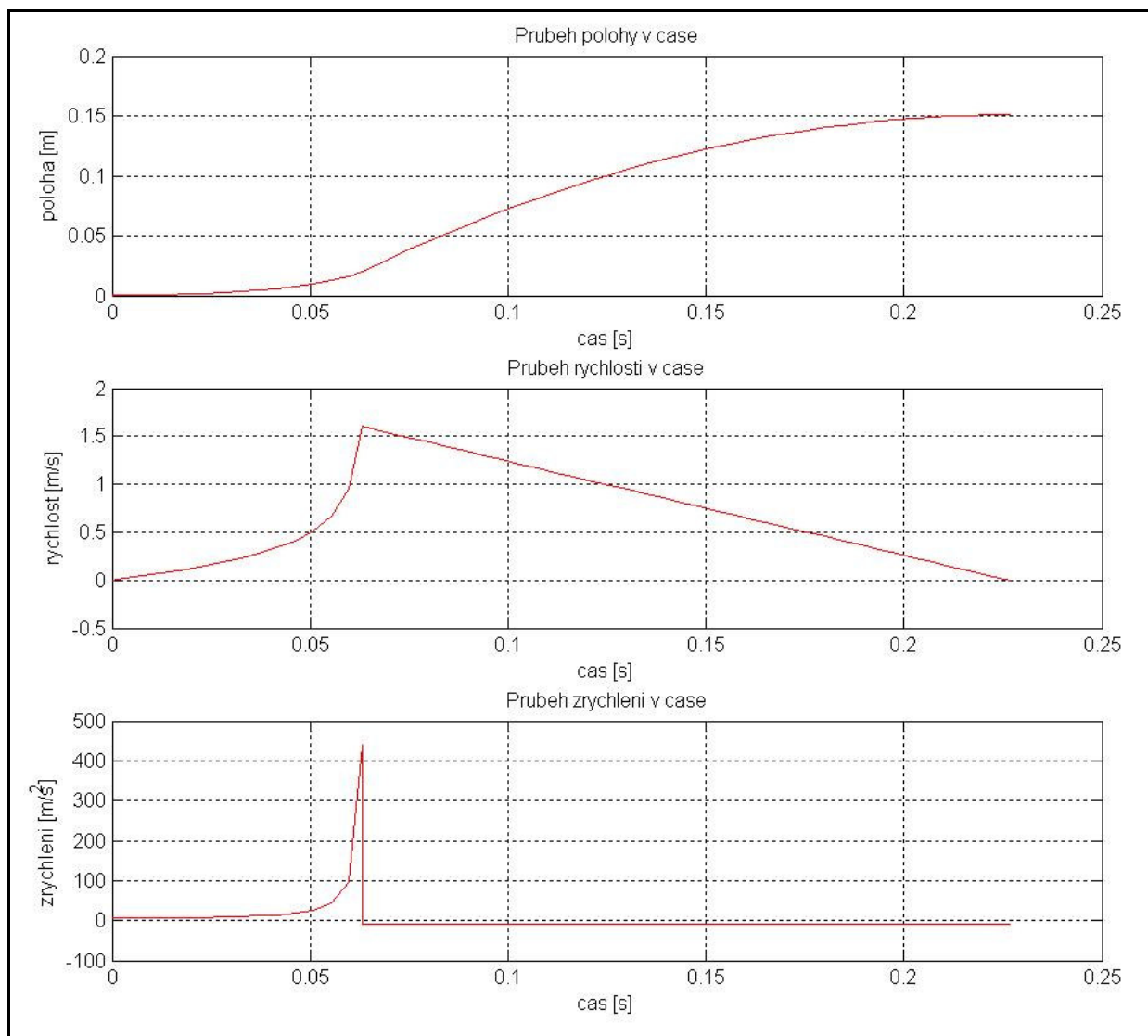
Obr. 49: Mechanický model pohonu v prostředí Matlab/Simulink

Z grafu průběhu síly působící na břemeno (viz Obr. 50) je vidět, že síla v čase $t = 0,63$ s dosáhne maximální velikosti 529,4 N, což odpovídá výsledkům získaným z Ansysu. Dále si lze všimnout, že po dosažení maxima, klesne síla na nulu. To znamená, že kotva dosáhla své maximální výchylky $x = 20$ mm, od této polohy dále už na břemeno nepůsobí a model vychází z rovnice (10).



Obr. 50: Průběh síly působící na břemeno – při proudové hustotě $2,5 \text{ A/mm}^2$

V Obr. 51 jsou vidět průběhy polohy, rychlosti a zrychlení pro mechanický model. Na spodním průběhu je vidět zrychlení, které roste od nuly, to znamená, že na počátku kotva stojí a začíná se pohybovat s exponenciálně vzrůstajícím zrychlením, tak jak roste magnetická síla F_m , v čase $t = 0,63 \text{ s}$ se nárůst zrychlování zastaví, to je okamžik, kdy kotva narazila na jádro a již se dále nemůže pohybovat. Velikost zrychlení ovšem od tohoto okamžiku není nulová, ale klesne na zápornou hodnotu tíhového zrychlení $g = -9,81 \text{ m/s}^2$, které působí na pohybující se břemeno. Vlivem exponenciálně vzrůstajícího zrychlení se mění i průběh rychlosti (viz prostřední graf v Obr. 51). V čase $t = 0,063 \text{ s}$. S konstantním záporným zrychlením, začne rychlost rovnoměrně klesat, až v čase $t = 0,225 \text{ s}$ dosáhne nulové hodnoty, poloha potom neroste konstantně, ale její nárůst se zpomaluje vlivem klesající rychlosti (viz horní graf v Obr. 51). V tomto okamžiku dosáhlo břemeno své maximální polohy $x = 0,15 \text{ m}$, kde se zastaví.



Obr. 51: Celkový průběh polohy, rychlosti a zrychlení

6.1.2. Elektrický model

Při vytváření elektrického modelu pohonu vycházíme ze vztahu pro stejnosměrný elektrický stroj.

$$u = R \cdot i + L(x) \cdot \frac{di}{dt} + u_i(x) \quad (11)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(x)} \left(u - R \cdot i - \frac{d\psi(x)}{dt} \right) \quad (12)$$

Vstupní hodnoty pro výpočet cívky

D	0,054	[m]	Průměr jádra cívky
l	0,045	[m]	Délka cívky
v	0,026	[m]	Výška cívky

Tab. 2: Tabulka vstupních hodnot pro výpočet cívky

Potom plocha cívky $S_c = l \cdot v$ $[m^2]$

$$S_c = 0,045 \cdot 0,026 = \underline{0,00117m^2}$$

Střední průměr cívky $r_{stř} = \frac{D + v}{2}$ $[m]$

$$r_{stř} = \frac{0,054 + 0,026}{2} = \underline{0,04m}$$

Vztah pro magnetický indukční tok

$$\phi(x) = B(x) \cdot S_{Fe} \quad [Wb] \quad (13)$$

Kde B je magnetická indukce získaná z modelu v Ansysu. Její hodnota je pro $x = 0$ mm $B_{x=0mm} = 0,72$ T a pro $x = 20$ mm je $B_{x=20mm} = 1,35$ T. S_{Fe} je průřez železa, $S_{Fe} = 0,0017$ m².

$$\phi_{x=0mm} = 0,72 \cdot 0,0017 \doteq \underline{0,0012Wb}$$

$$\phi_{x=20mm} = 1,35 \cdot 0,0017 \doteq \underline{0,0023Wb}$$

Vztah pro spřažený magnetický tok

$$\psi(x) = N \cdot \phi(x) \quad [Wb] \quad (14)$$

Kde $\Phi(x)$ je magnetický indukční tok získaný s předchozího vztahu a N je počet závitů cívky, který vypočteme pomocí vztahu

$$N = \frac{S_c}{S_d} \cdot 0,8 \quad [-] \quad (15)$$

Kde S_c je plocha cívky, S_d je průřez vodiče, který se spočte ze zvoleného průměru vodiče a konstanta 0,8 je odhadem stanovený koeficient plnění pro vodiče s kruhovým průřezem.

$$S_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad [m^2] \quad (16)$$

d je zvolený průměr vodiče, z katalogu byl vybrán průměr 0,6 mm, potom

$$S_d = \frac{\pi \cdot 0,0006^2}{4} = 2,826 \cdot 10^{-7} m^2 \doteq \underline{0,28mm^2}$$

$$N = \frac{0,00117}{2,8 \cdot 10^{-7}} \cdot 0,8 \doteq \underline{3312 \text{ závitů}}$$

Potom spřažený magnetický tok je

$$\psi_{x=0mm} = 3312 \cdot 0,0012 \doteq \underline{4,1Wb}$$

$$\psi_{x=20mm} = 3312 \cdot 0,0023 \doteq \underline{7,7Wb}$$

Jestliže známe hodnoty magnetického indukčního toku $\phi(x)$ a hodnoty zpraženého magnetického toku $\psi(x)$, lze vypočítat indukčnost cívky

$$\psi(x) = L(x) \cdot i \Rightarrow L(x) = \frac{\psi(x)}{i} \quad [H] \quad (17)$$

Kde $\psi(x)$ je spřažený magnetický tok z předchozího vztahu a i je proud cívky, vypočtený z ohmova zákona.

Pro výpočet teoretického proudu i_c navrženou cívku použijeme vztah pro proudovou hustotu

$$J = \frac{i_c}{S_c} \Rightarrow i_c \cdot N = J \cdot S_c = 2500000 \cdot 0,00117 \doteq \underline{2900Az}$$

Kde J je zvolená proudová hustota zadávaná v Ansysu a S_c je plocha okna pro cívku

Když známe napájecí napětí, které jsme stanovili na 48 V a odpor navržené cívky, který vypočteme ze známých rozměrů cívky a celkové délky drátu namotaného na cívce, můžeme z ohmova zákona vypočítat celkový proud cívku

$$i = \frac{u}{R} \quad [A]$$

Kde u je napájecí napětí a R je celkový odpor měděného vodiče, navinutého na cívce

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_d}{S_d} \quad (18)$$

Kde S_d je průřez zvoleného měděného vodiče, který je do tohoto vztahu potřeba zadávat v mm^2 , l_d je celková délka měděného vodiče namotaného na cívce a ρ_{Cu} je měrný elektrický odpor

$$l_d = 2\pi \cdot r_{stř} \cdot N = 2\pi \cdot 0,04 \cdot 3312 = \underline{832m}$$

Potom

$$R = 0,0178 \cdot \frac{832}{0,28} \doteq \underline{52,4\Omega}$$

$$i = \frac{48}{52,4} \doteq \underline{0,92A}$$

Nyní už lze dosadit do vztahu pro indukčnost cívky

$$L_{x=0mm} = \frac{4,1}{0,92} \doteq \underline{4,5H}$$

$$L_{x=20mm} = \frac{7,7}{0,92} \doteq \underline{8,5H}$$

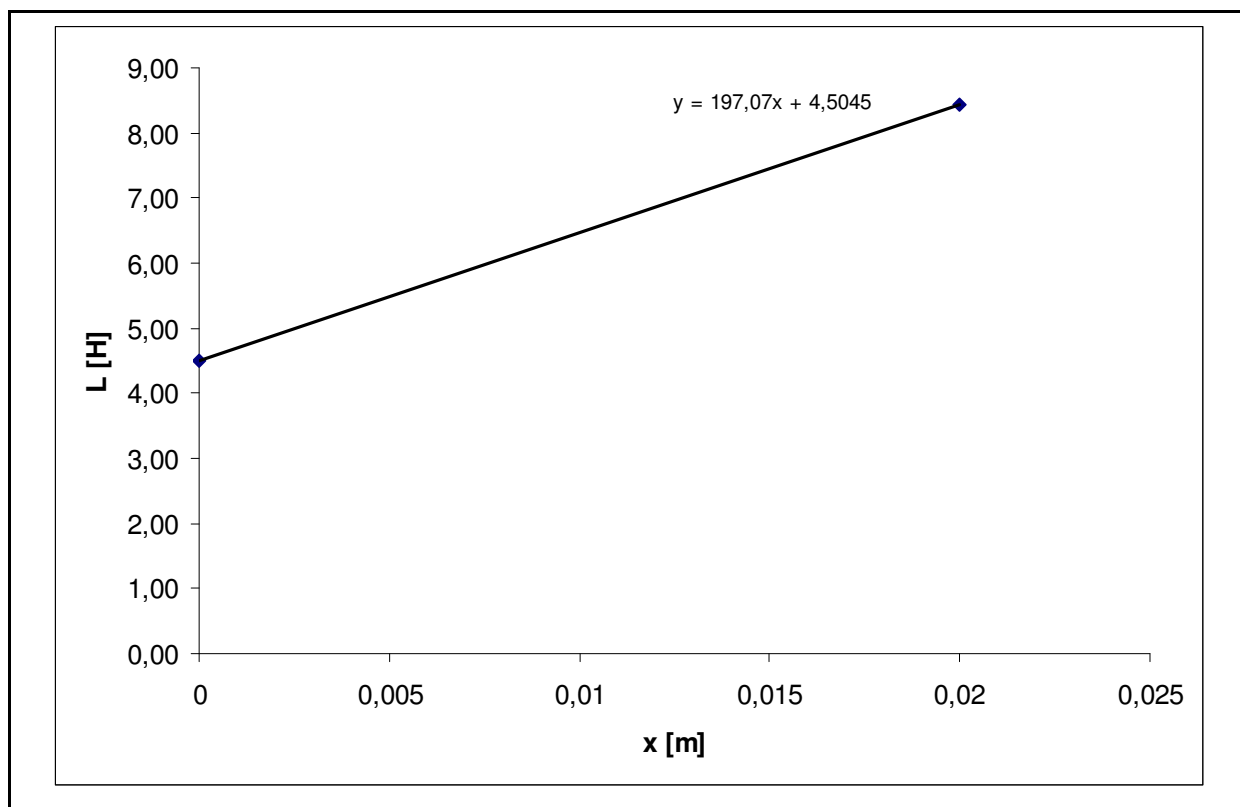
Z rozdílných hodnot indukčností na začátku a na konci dráhy jsme sestavili graf závislosti indukčnosti cívky na poloze kotvy (viz Obr. 52). Jestliže známe hodnotu počáteční indukčnosti L_0 a známe funkci závislosti indukčnosti na poloze kotvy, lze tyto hodnoty dosadit do rovnice

$$L(x) = L_0 + k \cdot x \quad (19)$$

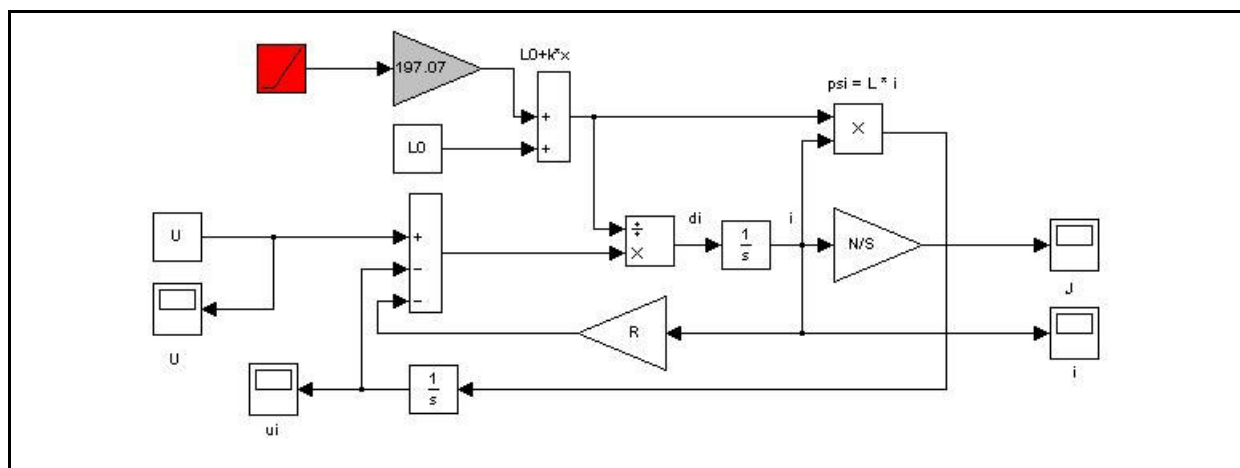
Potom upravíme vztah (12)

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{(L_0 + k \cdot x)} \left(u - R \cdot i - \frac{d\psi(x)}{dt} \right) \quad (20)$$

Elektrický model (viz Obr. 53) vychází z rovnice (20). Funkci závislosti indukčnosti na poloze kotvy v elektrické části modelu reprezentuje šedý blok (viz Obr. 53). Vzhledem ke zmíněné závislosti je v elektrickém modelu vložena funkce (viz červený blok v Obr. 53), která zajistí jeho funkčnost.



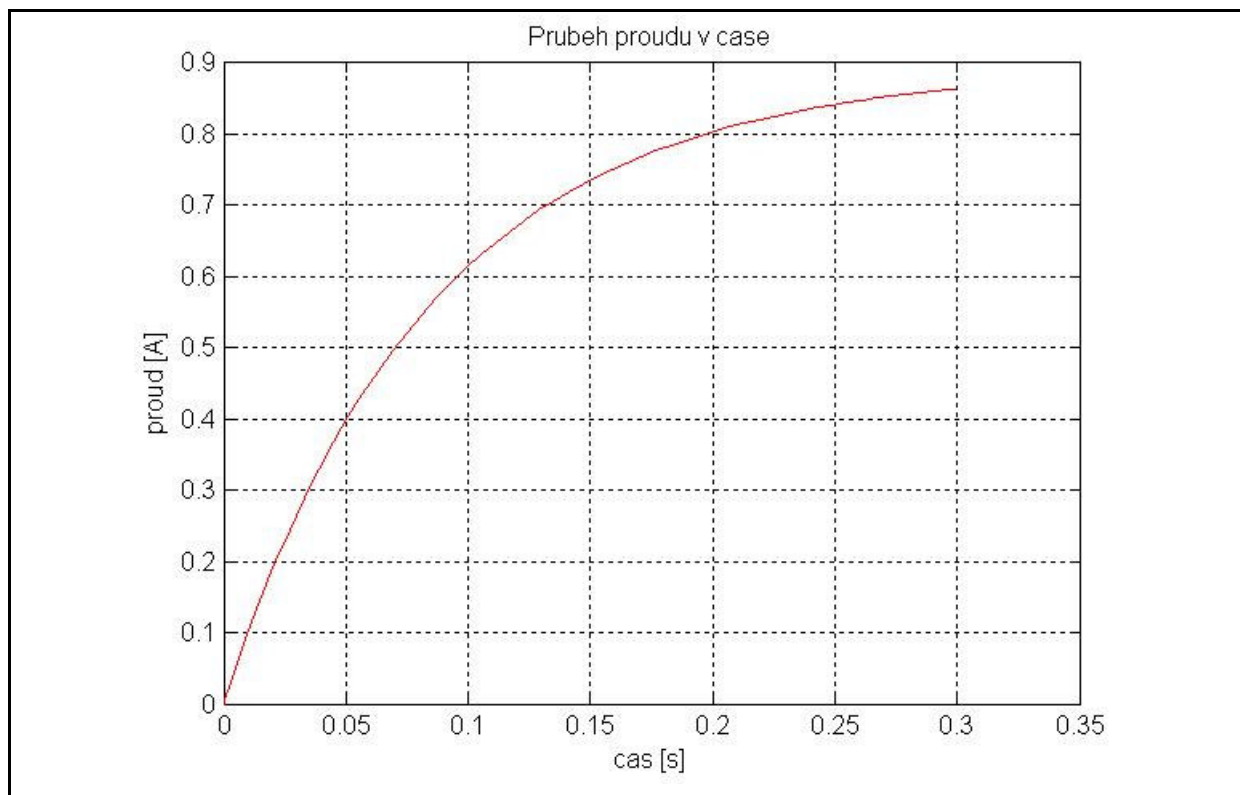
Obr. 52: Graf závislosti indukčnosti cívky na poloze kotvy



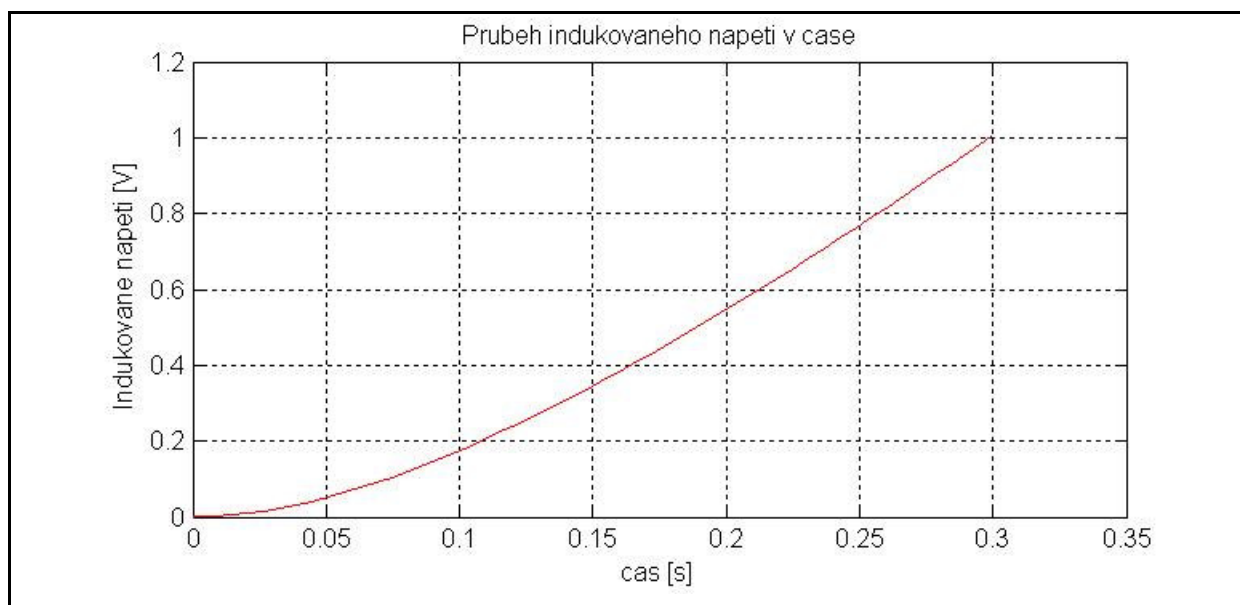
Obr. 53: Model elektrické části pohonu

V okamžiku přivedení napájecího napětí $u = 48 \text{ V}$ na cívku je proud $i = 0 \text{ A}$, ale postupně roste, až v čase $t = 0,3 \text{ s}$ dosáhne konstantní hodnoty cca $0,86 \text{ A}$ (viz Obr. 54). Tento průběh se dal očekávat, vzhledem ke skutečnosti, že proud je závislý na indukčnosti $L(x)$ a spřaženém magnetickém toku $\Psi(x)$, přičemž obě proměnné závisejí na poloze kotvy x . Indu-

kované napětí (viz Obr. 55) závisí také na spřaženém magnetickém toku $\Psi(x)$, bude proto také narůstat s rostoucí polohou kotvy x . V čase $t = 0,3$ s dosáhne jeho velikost hodnoty $u_i = 1$ V.



Obr. 54: Průběh proudu v cívce

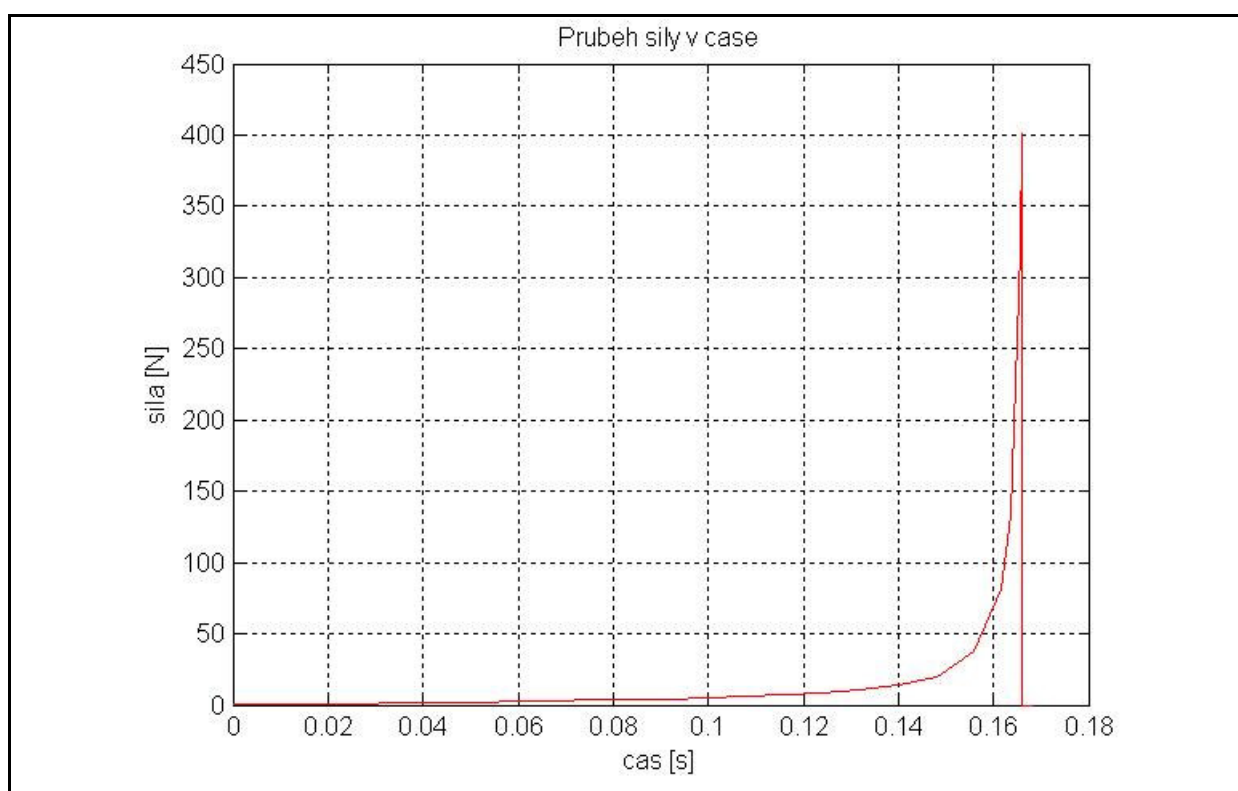


Obr. 55: Graf průběhu indukovaného napětí

Konstanty použité v simulačním modelu pohonu

M	0,1	[kg]	Hmotnost břemene
m	1,1	[kg]	Hmotnost kotvy
g	9,81	[m/s ²]	Tíhové zrychlení
f	0,1	[-]	Koeficient tření ocel – ocel
O	0,02	[m]	Omezení posuvu kotvy
u	48	[V]	Napájecí napětí
R	52,4	[Ω]	Odpor cívky
L ₀	4,5	[m]	Počáteční indukčnost cívky
N	3312	[-]	Počet závitů
S	0,00117	[m ²]	Plocha cívky

Tab. 3: Tabulka konstant použitých v simulačním modelu pohonu

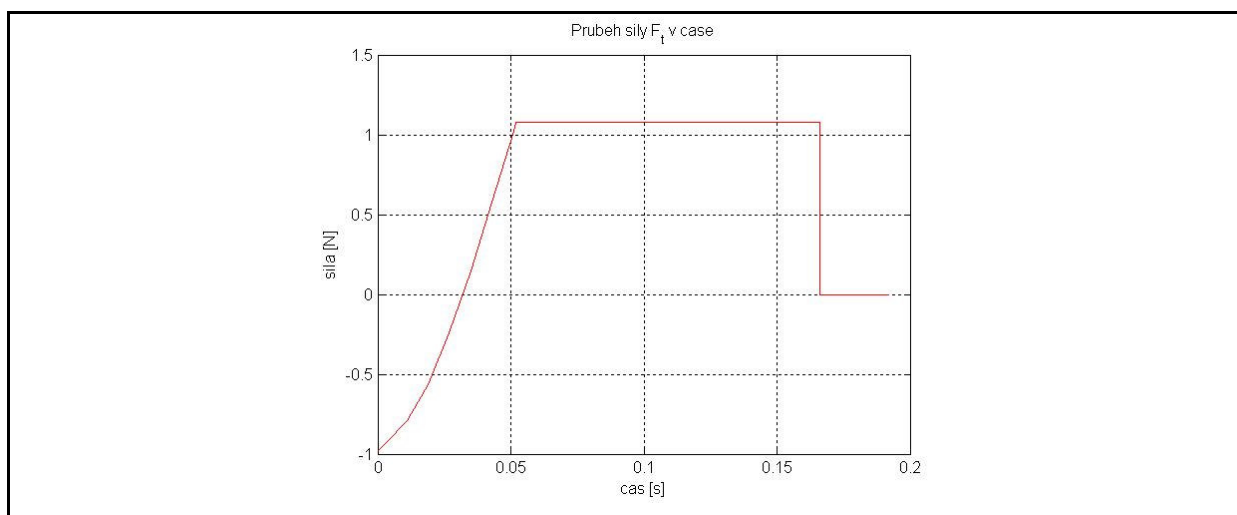


Obr. 57: Průběh síly působící na břemeno

Na Obr. 57 je průběh síly působící na břemeno, jak je vidět, tak síla dosáhne velikosti cca 400 N v čase $t = 0,166$ s. Dosažená velikost síly je ovlivněna časem vypnutí elektromag-

netu, to znamená, že pokud jej odpojíme dříve, tak maximální dosažená velikost síly bude menší a naopak pokud bychom jej odpojily později, tak maximální velikost síly by byla větší.

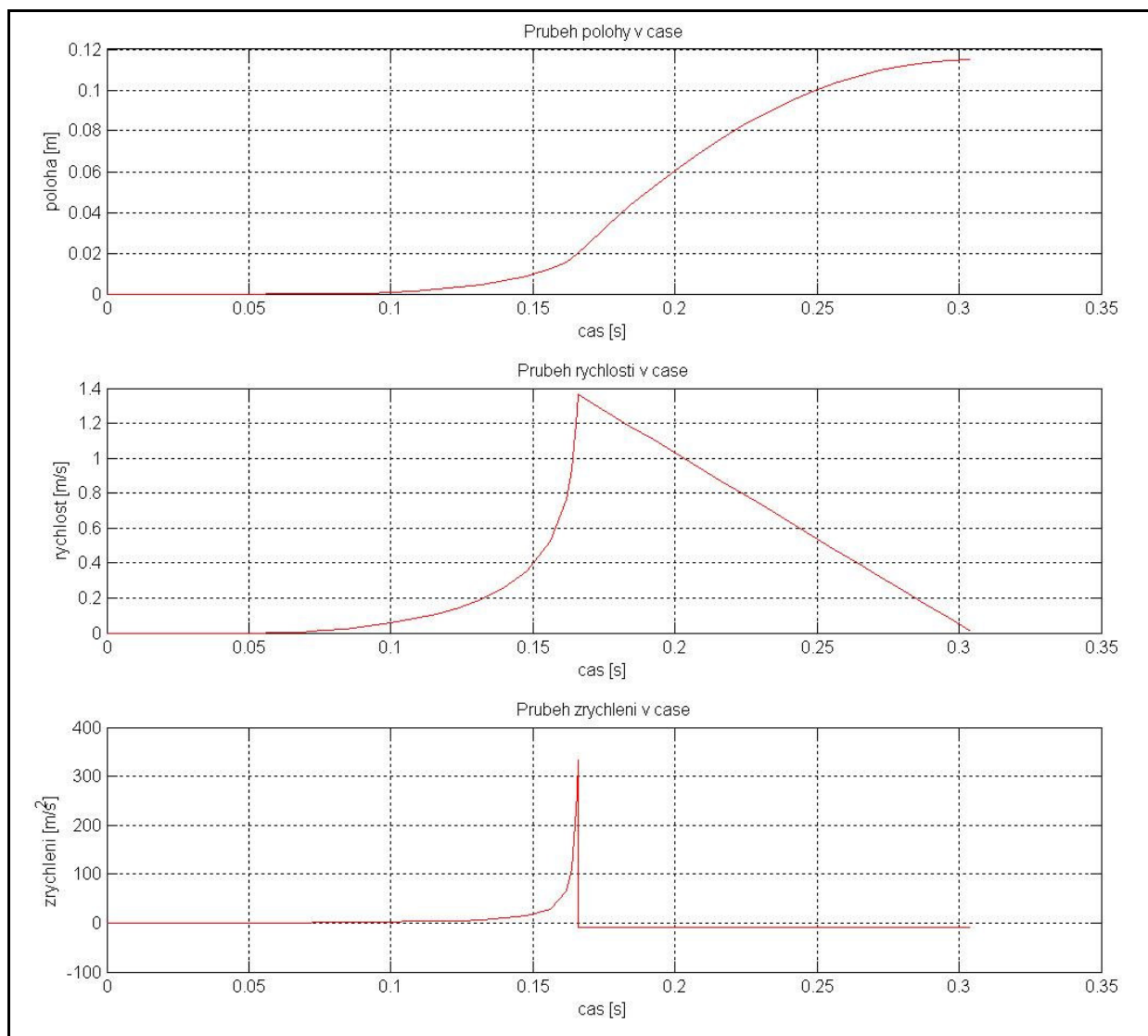
Na Obr. 58 je průběh tečné síly F_t , z grafu je vidět, že v čase $t = 0$ s má síla velikost $F_t = -0,981$ N, což je velikost tíhové síly G_M , působící na břemeno. V čase $t = 0$ je magnetická síla $F_m = 0$ N. Síla F_t postupně narůstá, tak jak roste magnetická síla F_m . V okamžiku kdy velikost síly F_m dosáhne velikosti tíhové síly G_M , je tečná síla $F_t = 0$ N.



Obr. 58: Průběh tečné síly

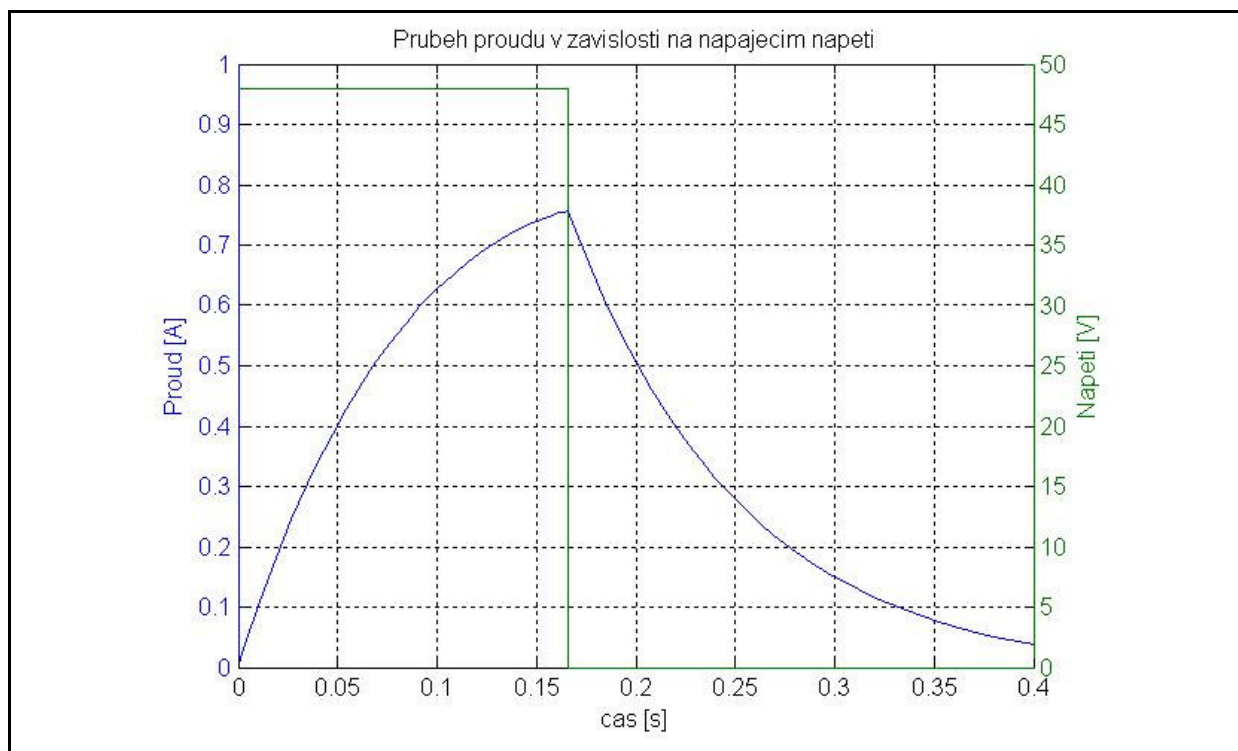
Vzhledem k tomu, že magnetická síla F_m stále roste, tak roste i tečná síla F_t , podle vztahu $F_t = F_m - G_M$. V čase $t = 0,05$ s dosáhne síla F_m takové hodnoty, že je její velikost již dostatečná, aby pohnula kotvou. V tomto okamžiku se tečná síla F_t mění na třecí sílu F_T , o konstantní velikosti $F_T = f \cdot F_n$. V čase $t = 0,166$ s dojde k zastavení kotvy, proto i třecí síla F_T klesá na nulu.

Na Obr. 59 je vidět na dolním grafu průběh zrychlení, které postupně roste, tak jak roste magnetická síla F_m , v okamžiku vypnutí elektromagnetu klesá zrychlení na konstantní hodnotu tíhového zrychlení $g = -9,81$ m/s². Když roste zrychlení v čase, roste i rychlost. Ovšem po vypnutí elektromagnetu začne rychlost klesat z důvodu konstantní záporné hodnoty zrychlení. Poloha břemene s narůstající rychlostí také roste, ale poté co začala rychlost klesat dojde k postupnému zpomalování nárůstu polohy břemene, až se zastaví v maximální dosažené poloze $x = 0,125$ m, v čase $t = 0,3$ s.

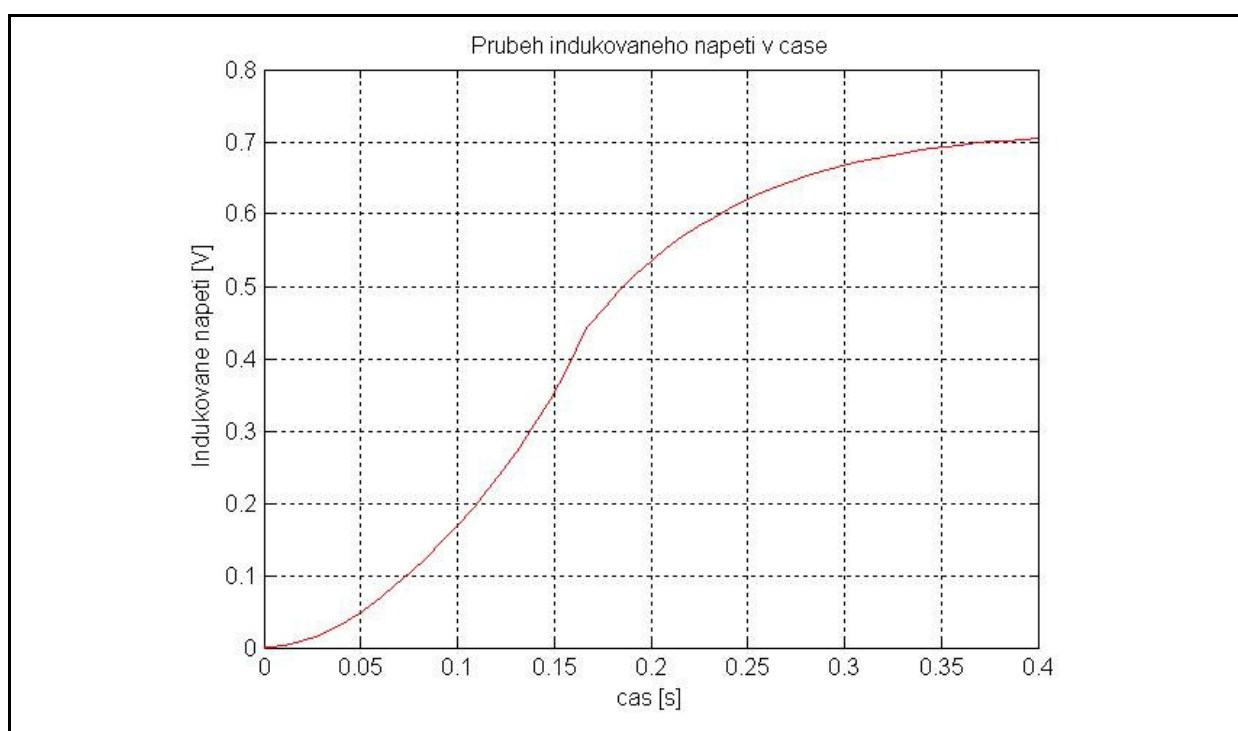


Obr. 59: Průběh polohy, rychlosti, zrychlení

V grafu na Obr. 60 je vidět průběh proudu cívkou (viz modrá křivka). Po připojení napájecího napětí na cívku nenaroste proud na maximální hodnotu okamžitě, ale roste pozvolna s rostoucí polohou kotvy x . Průběh indukovaného napětí v cínce je vidět v grafu na Obr. 61. Z grafu je patrné, že indukované napětí roste také s rostoucí polohou kotvy x . V čase $t = 0,166$ s dojde k vypnutí napájení cívky (viz zelená křivka v Obr. 60), což se v průběhu proudu projeví náhlou změnou z narůstajícího trendu k poklesu. Tím se změní i průběh indukovaného napětí, tak že dojde k pozvolnému snižování nárůstu jeho velikosti.



Obr. 60: Průběh proudu v závislosti na napájecím napětí

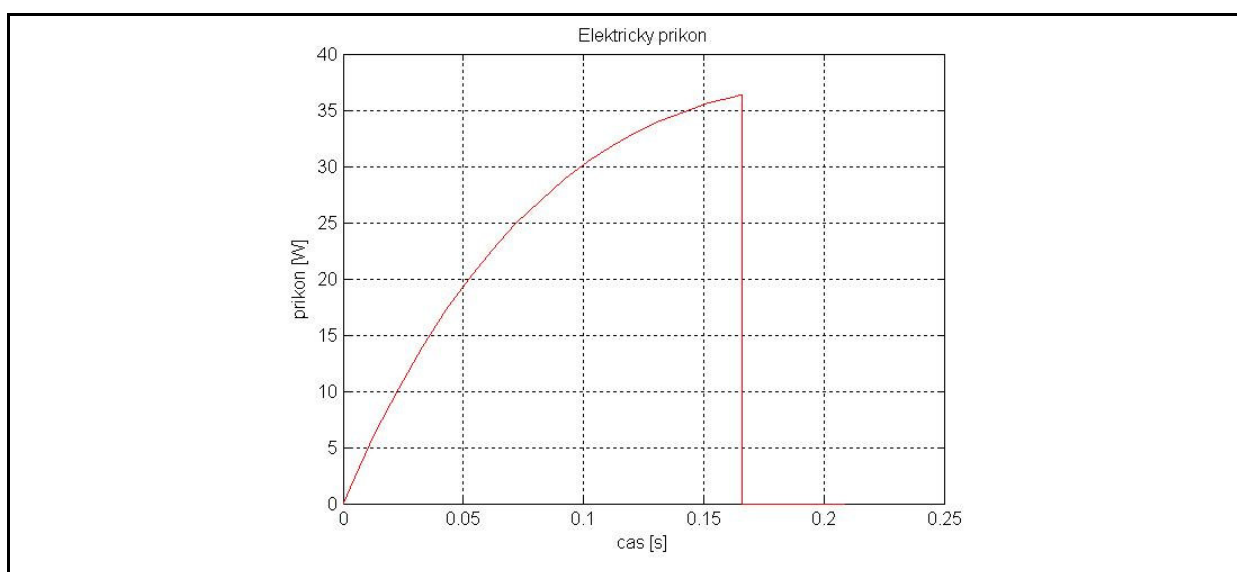


Obr. 61: Průběh indukovaného napětí

6.2. Energetická bilance

Příkon pohonu je dán součinem napájecího napětí a průběhu proudu na cívce

$$p = u \cdot i(t) \quad (21)$$



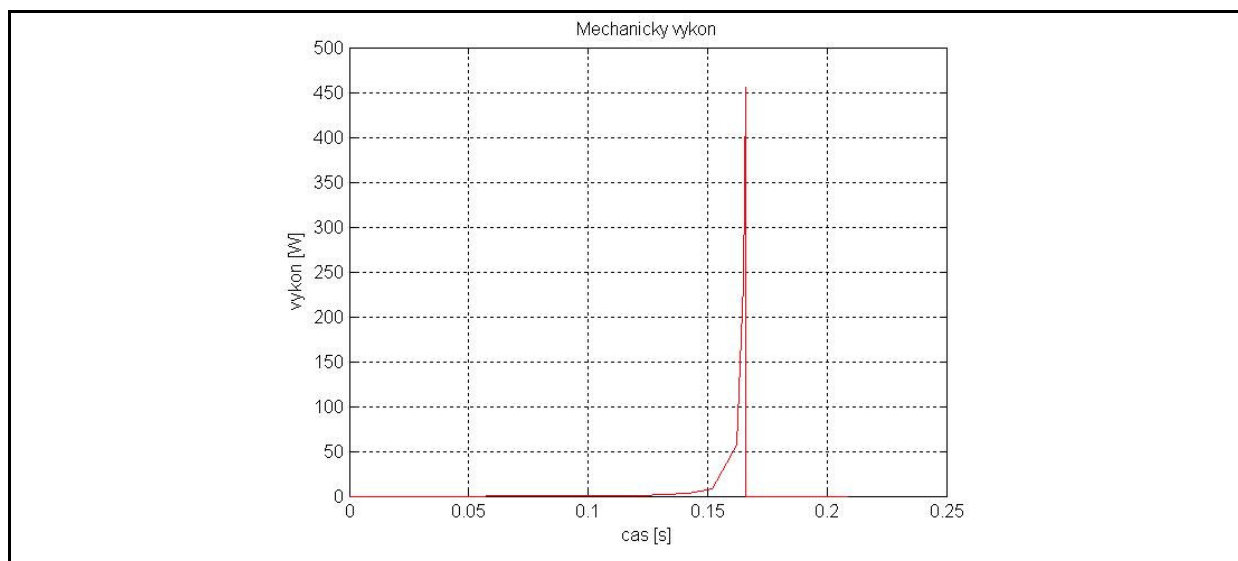
Obr. 62: Elektrický příkon pohonu

Celková elektrická energie Q_{el} dodaná je plocha pod křivkou (viz Obr. 62) a do času $t = 0,166$ s je tato plocha, tedy energie rovna 4 J. Z této hodnoty vypočteme střední hodnotu příkonu pohonu

$$P_{el, str} = \frac{Q_{el}}{t} = \frac{4}{0,15} = \underline{\underline{26,6 \text{ W}}}$$

Mechanický výkon je dán součinem setrvačné síly a rychlosti pohybu břemene (viz Obr. 63)

$$p_{mech} = F \cdot v = m \cdot \ddot{x} \cdot \dot{x} \quad (22)$$



Obr. 63: Mechanický výkon pohonu

Střední mechanický výkon pohonu

$$P_{mech, stř} = \frac{Q_{mech}}{t} = \frac{1}{0,15} = \underline{6,7 \text{ W}}$$

Hodnota mechanického výkonu 6,7 W je o něco větší než je hodnota výkonu doporučená při návrhu konstrukce, která byla 1 – 5 W.

Účinnost

$$\eta = \frac{P_{mech, stř}}{P_{el, stř}} \cdot 100 = \frac{6,7}{26,6} \cdot 100 \doteq \underline{25,2 \%}$$

Účinnost pohonu není příliš příznivá neboť tento návrh nepočítá s využitím zbytkové energie magnetického pole. Nicméně pokud by byla využita rekuperace, dala by se tato energie akumulovat zpět do zdroje.

7. MOŽNOSTI ŘÍZENÍ LINEÁRNÍHO POHONU

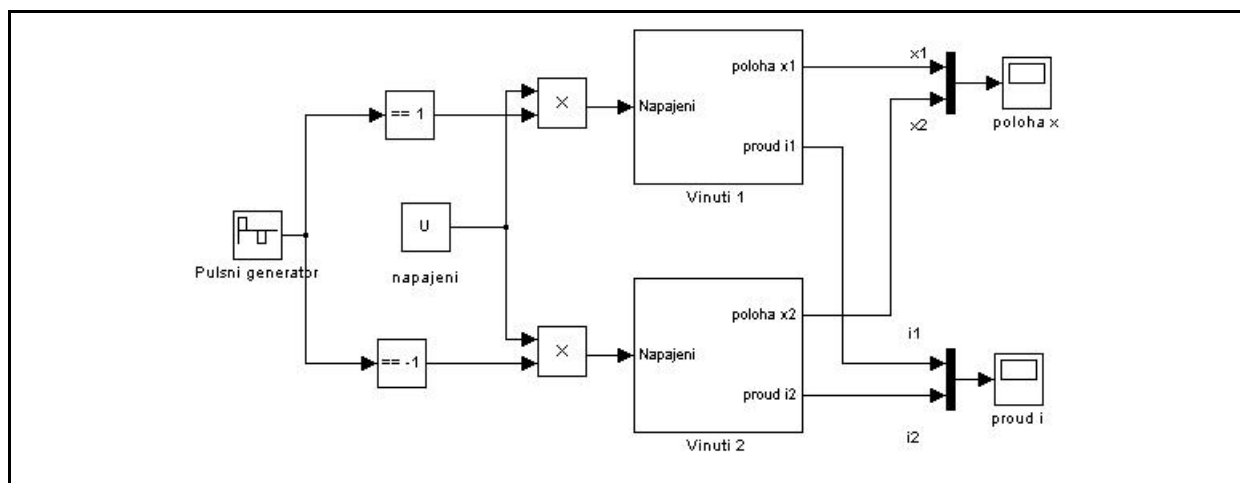
Vzhledem k tomu, že jsme pro návrh pohonu použili koncepci, kdy se snažíme dosáhnout maximálního proudu a navržený pohon je z hlediska konstrukce celkem jednoduchý, mohlo by být i řízení tohoto pohonu poměrně jednoduché. Diskutované možnosti řízení počítají s použitím v otevřené smyčce, bez zpětné vazby.

Jednou z možností, jak řídit model pohonu (viz Obr. 56) je vytvořit spínání závislé na poloze kotvy x . Tento způsob řízení počítá s tím, že vinutí se bude vypínat až bude kotva přitažena na doraz. Když dojde k sepnutí vinutí 1, vyčká se, až bude kotva přitažena $x_1 = 20 \text{ mm}$. Poté se odpojí vinutí 1 a je nutné vyčkat, až bude i proud $i_1 = 0 \text{ A}$, pak bude i magnetická síla $F_{m1} = 0 \text{ N}$. V dalším kroku se připojí napájení na vinutí 2, přičemž proces se bude opakovat.

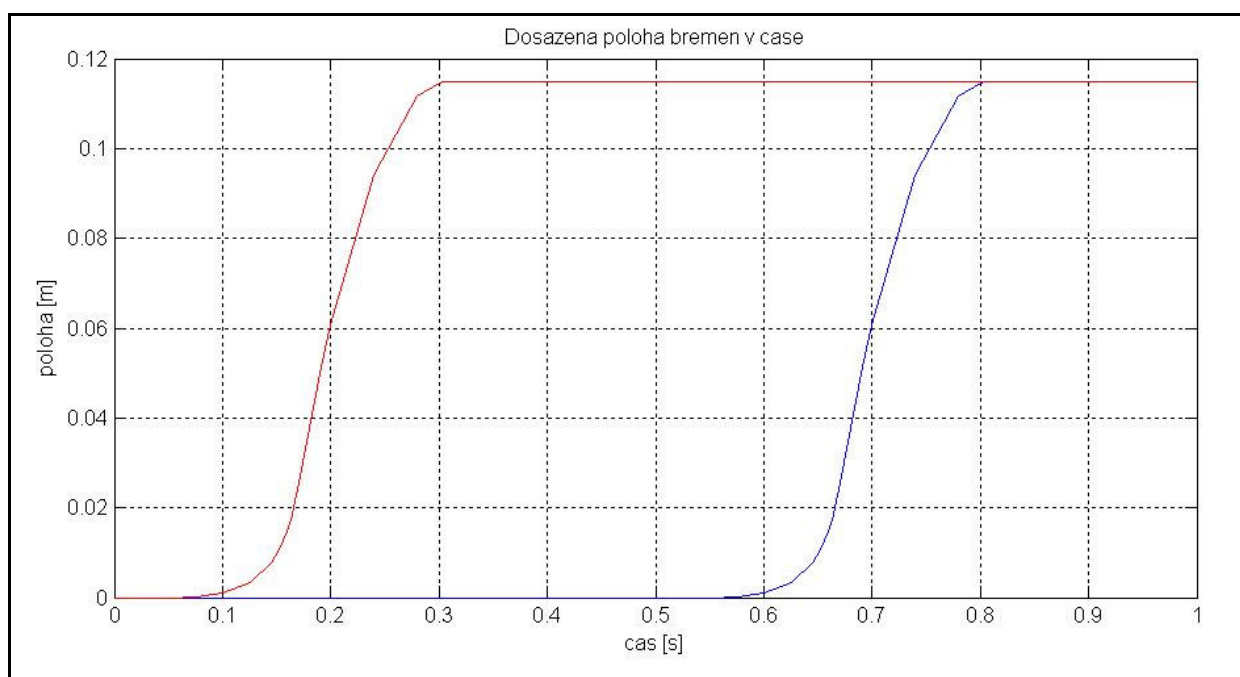
Další možností řízení by bylo řízení závislé na čase. To znamená, že by byl zvolen časový okamžik, kdy by došlo k odpojení napájení prvního vinutí a připojení napájení na druhé vinutí. V simulačním modelu v Matlab/Simulink bychom jako řídicí prvek použili pulsní generátor, který by v určených časových intervalech přepínal napájení do jednotlivých vinutí. Konkrétních možností tohoto způsobu řízení je více a záleží na nastavení pulsního generátoru, ve které chvíli dojde k odpojení napájení na vinutí 1 a připojení napájení na vinutí 2. Pokud by byl zvolen krátký časový okamžik, kdy například na vinutí 1 ještě působí nenulový proud i_1 , to znamená, že magnetická síla F_{m1} je také nenulová a již by se přivedlo napájecí napětí na vinutí 2, došlo by k situaci, kdy by si elektromagnety vzájemně „přetahovaly“ kotvu. Tento typ řízení by vyžadoval vytvoření charakteristiky vzájemného působení magnetických sil mezi oběma vinutími. Další variantou tohoto řízení je vypínat napájení vinutí dříve, než kotva dosáhne polohy $x_1 = 20 \text{ mm}$ nebo $x_2 = 20 \text{ mm}$, to znamená že síla na břemeno by nedosáhla možného maxima a i kotva by narazila na doraz menší silou. Z uvedeného je zřejmé, že záleží na konkrétní aplikaci, pro kterou bude pohon navrhován a potom se také vybere a realizuje vhodně řešené řízení.

Na Obr. 64 je vidět model řízení. Model je řízen, tak že pulsní generátor funguje jako spínač napájecího napětí. Když je na výstupu pulsního generátoru „1“ je sepnuté vinutí 1, pokud je na jeho výstupu „-1“, je sepnuté vinutí 2. V tomto konkrétním modelu je vinutí 1 sepnuté v čase $t = 0 \text{ s} - 0,2 \text{ s}$, vinutí 2 je sepnuté v čase $t = 0,5 \text{ s} - 0,7 \text{ s}$. Na průběhu poloh břemene jedna (viz červená křivka v Obr. 65) a břemene 2 (viz modrá křivka) je vidět, že obě dosáhnou polohy cca $x = 0,115 \text{ m}$, vždy za dobu $0,3 \text{ s}$ od sepnutí vinutí. Z grafu je také patr-

né, že pokud břemeno dosáhne maximální polohy, v této poloze nadále setrvává a nevrací se nazpět. Tento stav vychází z předpokladu, že pokud by pohon pracoval jako čerpadlo, tak čerpaná kapalina by se v maximální poloze rozlévala mimo potrubí a dále by v pohonu nepůsobila.



Obr. 64: Schéma řízení pohonu



Obr. 65: Průběh poloh břemen pro jednu periodu

8. ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo zpracování analýzy používaných lineárních pohonů a návrh konstrukce oscilačního lineárního pohonu s vnějším buzením, tak aby splňoval doporučené vstupní parametry. Zadané cíle byly splněny, jak je popsáno dále.

V úvodní části práce je popsán obecný princip lineárního motoru (viz kap. 2.1) a dále je zde uvedeno také rozdělení jednotlivých typů lineárních motorů (viz kap. 2.2). Analýza používaných lineárních pohonů je uvedena v další části této práce (viz kap. 2.3 a 2.4) jedná se zejména o oblast lineárních pohonů z patentové databáze.

Samotný návrh konstrukce oscilačního lineárního pohonu je popsán v kap. 4. Jsou zde uvedeny 3 návrhy konstrukce. Přičemž podrobněji zpracován a simulačně modelován byl druhý návrh z 4.2, konkrétně podle Obr. 34. Geometrický model byl vytvořen v konstrukčním software Solidworks 2007 a výsledek konstrukčního návrhu lze vidět v řezu na Obr. 37 a Obr. 38. Výkresová dokumentace tohoto návrhu je v elektronické verzi na přiloženém datovém nosiči.

Pro navrženou konstrukci pohonu byl v software Ansys také vytvořen simulační model (viz kap. 5.2), ve kterém byla zjišťována výsledná síla, pro několik proudových hustot ($0,5 \text{ A/mm}^2$ - $2,5 \text{ A/mm}^2$) v cívce a několik poloh kotvy (0 mm – 20 mm). Naším cílem bylo navrhnout elektromagnet tak, aby minimální přitahující síla měla velikost 10 N .

V další části byl proveden rozbor mechanických silových účinků na zjednodušeném modelu pohonu (viz kap. 6). Vzhledem k tomu, že v zadání nebyl přesně specifikován typ zátěže pohonu, byly některé zatěžující účinky zjednodušeny. Z výsledků mechanických silových účinků byl v software Matlab/Simulink sestaven mechanický model (viz Obr. 49, kap. 6.1.1). V kap. 6.1.2 je popsán výpočet cívky a vytvořen elektrický model pohonu (viz Obr. 53), přičemž výsledky tohoto modelu lze vidět na Obr. 54 a Obr. 55. Komplexní mechatronický model navrženého pohonu je v kap. 6.1.3.

V poslední části práce jsou uvedeny možnosti řízení pohonu. Prakticky je nasimulováno časové řízení pohonu pomocí pulsního generátoru (viz Obr. 64). Časový generátor pro tuto simulaci byl nastaven tak, že na dobu $t = 0,2 \text{ s}$ sepneme vinutí 1 a v momentě kdy břemeno 1 dosáhne maximální polohy, je vložena časová prodleva $t = 0,3 \text{ s}$ než dojde na dobu $t = 0,2 \text{ s}$ k sepnutí vinutí 2. Poté, co dosáhne maximální polohy břemeno 2, je opět vložena časová prodleva $t = 0,3 \text{ s}$ než dojde opět k sepnutí vinutí 1. V grafu na Obr. 65 je vidět průběh poloh břemen pro jednu periodu.

Při návrhu oscilačního lineárního pohonu, byl mimo jiné kladen důraz také na jednoduchost konstrukce, proto byla zvolena koncepce elektromagnetu. Byla vytvořena varianta, ve které elektromagnet pracuje v impulsním režimu, to znamená, že v krátkém časovém úseku dojde k vzniku silného impulzu síly, který působí na zátěž. Z tohoto důvodu bylo také přistoupeno ke zkrácení amplitudy kmitavého pohybu na 20 mm.

Návrh a veškeré simulace lineárního pohonu předpokládají jeho provoz ve vodorovné poloze.

Pokud bychom chtěli navrhovat lineární pohon přímo pro čerpadlo, museli bychom do předešlých výpočtů zahrnout též hydrostatické a hydrodynamické účinky od čerpané tekutiny, případně tlumení ventilů apod.

Pro další rozvoj této práce by bylo zajímavé otestovat konstrukci pohonu, kdy se do magnetického obvodu přidají permanentní magnety a zřejmě bude také zapotřebí optimalizovat především rozměry celého zařízení, které se v tuto chvíli nejeví příliš příznivé.

9. POUŽITÁ LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE

- [1] VUES Brno s.r.o., Dostupné z: < <http://www.vues.cz> >
- [2] Hiwin s.r.o., Dostupné z: < <http://www.hiwin.cz> >
- [3] Parker Hannifin Co., Dostupné z: < <http://www.parker.com> >
- [4] Honců J., Stříbrský A., Akční členy – Elektromotory. Přednáška z předmětu Instrumentace procesů, katedra řídicí techniky ČVUT – FEL Praha. [online], [cit. 19. prosince 2009], Dostupné z: < http://dce.felk.cvut.cz/ip/prednasky/IP_elektropohony.pdf >
- [5] Engineering news, Dostupné z: < <http://www.engineerlive.com/> >
- [6] Uher, P., Bezželezné lineární motory. Článek v časopisu Automa 01/2006. Brno. 2006. [cit. 20. prosince 2009], [online], Dostupné z: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30889 >
- [7] Baumüller, Dostupné z: < <http://www.baumueller.de/> >
- [8] Rotační a lineární krokové motory. Studijní materiál. [cit. 6. ledna 2010], [online], Dostupné z: < http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/linear/Rota%E8n%ED%20a%20line%E1rn%ED%20krokov%E9%20motory.doc >
- [9] Allegro microsystems, Inc, Dostupné z: < <http://www.allegromicro.com/en/> >
- [10] Roubíček, O. Tendence vývoje v oblasti průmyslových elektrických lineárních pohonů (1). MECHATRONIKA Praha. Článek v časopise ELEKTRO 2004/03., [cit. 8. ledna 2010], [online], Dostupné z: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25741 >
- [11] Mayer, D. Nové možnosti magnetické levitace v dopravě? Elektrotechnická fakulta ZČU v Plzni. Článek v časopise ELEKTRO 2003/12. [cit. 7. února 2010], [online], Dostupné z: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25632 >
- [12] Studer, P. A. Linear magnetic motor/generator. Číslo patentu: 4315197. 1982., [cit. 11. prosince 2009], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/4315197.html >
- [13] Konotchick, J. A. Linear motion electric power generator. Číslo patentu: 5347186. 1994., [cit. 20. prosince 2009], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/5347186.html >

-
- [14] Goldowsky, M. P., Linear pump. Číslo patentu: 5924975. 1999., [cit. 29. prosince 2009], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/5924975.html >
- [15] Motohashi, R., Tanahashi, M., Amaya, H., Maekawa, T., Okamoto, T., Ibuki, Y., Oudet, C., Prudham, D. Linear oscillating motor. Číslo patentu: 5736797. 1998., [cit. 4. ledna 2010], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/5736797.html >
- [16] Bhate, S. K. Linear oscillating electric machine with permanent magnet excitation. Číslo patentu: 4349757. 1982., [cit. 11. ledna 2010], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/4349757.html >
- [17] Kraus, B., Klos, A. Drive mechanisms for small electric appliances. Číslo patentu: 20050127759. 2004., [cit. 12. ledna 2010], [online], Dostupné z: < <http://www.patentstorm.us/applications/pdfs/applicationId/20050127759.html> >
- [18] Sakiya, F. Linear motor. Číslo patentu: 20070035184. 2007., [cit. 23. ledna 2010], [online], Dostupné z: < <http://www.patentstorm.us/applications/pdfs/applicationId/20070035184.html> >
- [19] Inagaki, K., Morita, I. Linear motor and linear compressor. Číslo patentu: 6946754. 2005., [cit. 22. ledna 2010], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/6946754.html >
- [20] Merritt, T. D., Pasichinskyj, Mario J. Linear reciprocating electrical generator. Číslo patentu: 4500827. 1985., [cit. 25. ledna 2010], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/4500827.html >
- [21] Hamajima, T., Inaguma, Y. Linear generator. Číslo patentu: 4924123. 1990., [cit. 2. února 2010], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/4924123.html >
- [22] Konotchick, J. A. Linear motion electric power generator. Číslo patentu: 5818132., 1998, [cit. 19. února 2010], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/5818132.html >
- [23] Kottke, W. C. Reciprocating pumps with linear motor driver. Číslo patentu: 6283720. 2001., [cit. 17. února 2010], [online], Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/6283720.html >
-

- [24] Alain, M. R., Penicaut. Permanent magnet linear door motor. Číslo patentu: 5175455. 1992. [cit. 20. října 2009] Dostupné z: < http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/5175455.html >
- [25] Technická dokumentace k Ansys

10. PŘÍLOHY

Příložený CD–R disk obsahuje:

Text diplomové práce ve formátu PDF

Modely vytvořené v CAD systému SolidWorks

Makro modelu pro spuštění v systému Ansys

Spustitelné simulační modely v systému Matlab/Simulink